



อิทธิพลของการอบแห้งลมร้อนร่วมกับระบบสันสะเทือนอัลตราโซนิกต่อการใช้พลังงานและสารสำคัญในการอบแห้งกระชายขาว

ปฎิพัทธ์ ถนอมพงษ์ชาติ

สาขาวิศวกรรมการจัดการพลังงานในงานอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

วีรศักดิ์ จอมกิตติชัย

สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

ภคมน ปินตานา*

สาขาวิศวกรรมการอนุรักษ์พลังงาน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 8619 6155 อีเมล: p.pintana@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.11.004

รับเมื่อ 18 สิงหาคม 2567 แก้ไขเมื่อ 4 ตุลาคม 2567 ตอบรับเมื่อ 22 ตุลาคม 2567 เผยแพร่ออนไลน์ 18 พฤศจิกายน 2567

© 2025 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการอบแห้งลมร้อนร่วมกับระบบสันสะเทือนอัลตราโซนิกในการอบแห้งกระชายขาว ที่มีต่อปริมาณการใช้พลังงานและคุณสมบัติของกระชายขาวหลังการอบแห้ง โดยใช้ตู้อบแห้งลมร้อนร่วมกับระบบสันสะเทือนอัลตราโซนิก ซึ่งติดตั้งระบบสันสะเทือนอัลตราโซนิก 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ถาดวางผลิตภัณฑ์ โดยมีระบบระบายความร้อนให้กับหัวสันสะเทือนเพื่อลดการสะสมความร้อนของชุดสันสะเทือน ทำให้สามารถอบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นได้ ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง คือ กระชายขาวซึ่งเป็นสมุนไพรที่มีสรรพคุณด้านการรักษาโรคและมีสารสำคัญภายในหลายชนิด โดยการทดลองทดสอบการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ด้วยตู้อบแห้งลมร้อนและตู้อบแห้งลมร้อนร่วมกับระบบสันสะเทือนอัลตราโซนิก เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอบแห้งผลการทดลองพบว่า ตู้อบแห้งลมร้อนร่วมกับระบบสันสะเทือนอัลตราโซนิกใช้เวลาในการอบแห้งกระชายขาวมีอัตราการระเหยน้ำ และประสิทธิภาพการอบแห้งสูงกว่าตู้อบแห้งลมร้อนในทุกช่วงอุณหภูมิการอบแห้ง อีกทั้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีการใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ต่ำที่สุด พร้อมวิเคราะห์เปรียบเทียบสัณฐานผลิตภัณฑ์ ค่าการต้านอนุมูลอิสระ ค่าฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ ฟินอสโตรบิน และแพนคูเรทิน เอ โดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการรักษาสารสำคัญในกระชายขาวแห้งได้ในปริมาณสูงที่สุดคือการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ร่วมกับระบบสันสะเทือนอัลตราโซนิก โดยมีอัตราการระเหยน้ำ ประสิทธิภาพทางความร้อนในการอบแห้ง และการใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้ง 0.250 กิโลกรัม/ชั่วโมง 20.72 เปอร์เซ็นต์ และ 29.960 กิโลวัตต์ ชั่วโมง/กิโลกรัม ตามลำดับ

คำสำคัญ: อบแห้งลมร้อน การสันสะเทือนอัลตราโซนิก กระชายขาว

การอ้างอิงบทความ: ปฎิพัทธ์ ถนอมพงษ์ชาติ, วีรศักดิ์ จอมกิตติชัย และ ภคมน ปินตานา, “อิทธิพลของการอบแห้งลมร้อนร่วมกับระบบสันสะเทือนอัลตราโซนิกต่อการใช้พลังงานและสารสำคัญในการอบแห้งกระชายขาว,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 35, ฉบับที่ 4, หน้า 1-11, เลขที่บทความ 254-087633, ต.ค.-ธ.ค. 2568.



Influence of Hot Air Drying Combined with Ultrasonic Vibration System on the Energy Consumption and Bioactive Compounds of White Fingerroot Drying

Patipat Thanompongchart

Industrial Energy Management Engineering, Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University, Uttaradit, Thailand

Weerasak Chomkitichai

Chemistry, Faculty of Science and Technology, Uttaradit Rajabhat University, Uttaradit, Thailand

Pakamon Pintana*

Energy Conservation Engineering, School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 09 8619 6155, E-mail: p.pintana@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.11.004

Received 18 August 2024; Revised 4 October 2024; Accepted 22 October 2024; Published online: 18 November 2024

© 2025 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research aims to investigate the efficiency of combining a hot air dryer with an ultrasonic vibration system in drying white turmeric and to study the properties of white turmeric after drying. For the hot air dryer combined with the 40 kilohertz of ultrasonic vibration system, a product placement tray was developed, with the installation of the ultrasonic vibration system along with a heat dissipation system for the vibrating head to dissipate accumulated heat. This system design allowed drying at higher temperatures. White turmeric was chosen as the experimental sample due to its medicinal properties and the presence of various important compounds. The drying experiments were conducted at temperatures of 50, 60, and 70 degrees Celsius using both the hot air dryer and the hot air dryer combined with the ultrasonic vibration system to compare drying performance. The results showed that the hot air dryer combined with the ultrasonic vibration system required less time for drying white turmeric, exhibited higher moisture removal rates, and achieved better drying efficiency compared to the hot air dryer alone at all drying temperature ranges. Additionally, at 70 degrees Celsius, the lowest specific energy consumption for drying the product was observed. Comparative analysis of product color, antioxidant activity, phenolics, flavonoids, pinostrobin, and panduratin A was also conducted. The optimal condition for preserving the active compounds in dried white fingerroot at the highest levels is drying at 60 degrees Celsius combined with an ultrasonic vibration system. The evaporation rate, thermal efficiency, and energy consumption were 0.250 kilogram/hour, 20.72 percent, and 29.960 kilowatt-hour/kilogram, respectively.

Keywords: Hot Air Drying, Ultrasonic Vibration, White Fingerroot

Please cite this article as: P. Thanompongchart, W. Chomkitichai and P. Pintana, "Influence of hot air drying combined with ultrasonic vibration system on the energy consumption and bioactive compounds of white fingerroot drying," *The Journal of KMUTNB*, vol. 35, no. 4, pp. 1–11, ID. 254-087633, Oct.–Dec. 2025 (in Thai).

1. บทนำ

กระชายขาวหรือกระชายเหลืองมีลักษณะเป็นเหง้าสั้น อวบน้ำ เป็นสมุนไพรที่บรรจุอยู่ในตำรับเครื่องยาไทย โดยงานวิจัยทางการแพทย์พบว่า สารสกัดกระชายขาวมีฤทธิ์การรักษาและป้องกันโรคหลายอย่าง รวมทั้งเพื่อป้องกันเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 [1] การทานกระชายขาว นอกจากการทานสดแล้วยังสามารถนำมาแปรรูปในรูปแบบของผลิตภัณฑ์ชนิดแคปซูล ผงกระชาย การอบแห้งกระชายขาว ส่วนใหญ่ใช้วิธีการตากแดดหรือการใช้ตู้อบลมร้อน ด้วยลักษณะทางกายภาพของกระชายเป็นหัวอวบน้ำจึงจำเป็นต้องแห้งเป็นชิ้นๆ เพื่อลดเวลาในการอบแห้ง อย่างไรก็ตามการอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์มีข้อจำกัด เนื่องจากขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมภายนอกและฤดูกาล จึงทำให้คุณภาพของกระชายแห้งที่ได้มีความไม่แน่นอน ส่วนการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่ใช้อุณหภูมิสูงเพื่อให้ผลิตภัณฑ์แห้งไว ทำลายสารสำคัญในกระชายสำหรับการป้องกันและรักษาโรค จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า สารสกัดจากกระชายขาว นอกจากจะมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ดี มีฤทธิ์ต้านการอักเสบ ยังพบฤทธิ์ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคทั้งเชื้อแบคทีเรีย เชื้อไวรัส และเชื้อราด้วย โดยสารสำคัญที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งไวรัส คือ แพนดราทิน เอ (Panduratin A) และพินอสโตรบิน (Pinostrobin) [2], [3]

ในกระบวนการแปรรูปอาหารระดับอุตสาหกรรม มีการนำอัลตราโซนิกมาประยุกต์ใช้ แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ อัลตราโซนิกกำลังต่ำความถี่สูง (Low Power and High Frequencies) และอัลตราโซนิกกำลังสูงความถี่ต่ำ (High Power and Low Frequencies) หรือที่เรียกว่า พาวเวอร์อัลตราโซนิก (Power Ultrasonic) ซึ่งนิยมนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหาร [4]–[6] การใช้ อัลตราโซนิกประเภทนี้ ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและทางเคมีของอาหารเนื่องจากคลื่นทำให้เกิดปรากฏการณ์ควิเทชัน (Cavitation) และส่วนมากใช้คลื่นในช่วงความถี่ 20–40 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นความถี่ที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์อัลตราโซนิกทั่วไปสามารถทำให้เซลล์แตกตัวได้ [4] การใช้คลื่นอัลตราโซนิก ร่วมกับกระบวนการอบแห้ง ช่วยลดอุณหภูมิการอบแห้ง

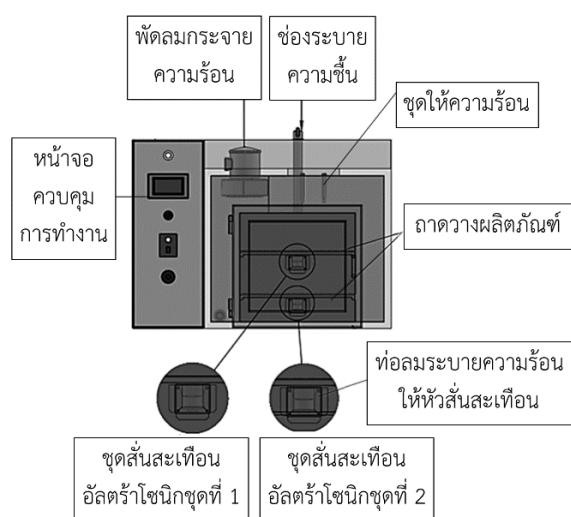
ลงได้และลดการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัว (Degradation) จากความร้อนของสารสำคัญในผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีการศึกษาที่เกี่ยวข้องในการนำคลื่นอัลตราโซนิกมาใช้ร่วมกับกระบวนการทำแห้งในการผลิตอาหารประเภทต่าง ๆ ในสภาวะที่แตกต่างกัน อาทิเช่น สับปะรด ลำไย พักทอง เป็นต้น [7]–[9] ผลการทดลองพบว่า คลื่นอัลตราโซนิกช่วยให้เพิ่มอัตราการระเหยของน้ำเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 30–60 เปอร์เซ็นต์ [10]–[12]

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการอบแห้งกระชายขาวด้วยตู้อบลมร้อนร่วมกับระบบสันสะเทือนอัลตราโซนิก เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนในการอบแห้งกับตู้อบลมร้อนทั่วไป พร้อมทั้งวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสี และสารสำคัญของกระชายขาวหลังการอบแห้ง เช่น ค่าการต้านอนุมูลอิสระ ค่าฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ ฟินอสโตรบิน และแพนดราทิน เอ โดยมีสมมติฐานการใช้ตู้อบลมร้อนร่วมกับระบบการสันสะเทือนอัลตราโซนิกจะสามารถกระตุ้นการระเหยของน้ำให้เร็วยิ่งขึ้นและยังคงรักษาสารสำคัญในกระชายขาวไว้ได้ ที่การอบแห้งอุณหภูมิต่ำ

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 ตู้อบแห้ง

ตู้อบลมร้อนที่ใช้ในการทดลองเป็นตู้อบลมร้อนที่พัฒนาขึ้นร่วมกับระบบสันสะเทือนอัลตราโซนิกมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1 โดยโครงสร้างภายนอกทำจากเหล็กแผ่นดัดขึ้นรูป ทำสี และภายในมีการบุฉนวนกันความร้อนและขึ้นรูปแผ่นสแตนเลสด้านใน ชุดสันสะเทือนอัลตราโซนิก ขนาดความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ และติดตั้งระบบระบายความร้อนให้กับชุดสันสะเทือนผ่านท่อลมติดตั้งได้ถาวร ผลิตภัณฑ์จำนวน 2 ชุด และมิวเจอร์ควบคุมการทำงานให้สามารถทำงานตามเวลาที่ตั้งไว้ ระบบให้ความร้อนของตู้อบลมร้อนใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้า และมีพัดลมพัดกระจายลมร้อนเพื่อให้ภายในตู้อบลมร้อนให้มีการไหลเวียนของลมสม่ำเสมอและมีการระบายความชื้นออกทางด้านบนของตู้อบลมร้อน



รูปที่ 1 โครงสร้างองค์ประกอบตู้อบแห้งลมร้อนร่วมกับระบบสั่นสะเทือนอัลตราโซนิก



รูปที่ 2 ลักษณะการบรรจุกระชายขาวในตู้อบแห้งลมร้อนร่วมกับระบบสั่นสะเทือนอัลตราโซนิก

2.2 การเตรียมกระชายขาวสำหรับการอบแห้ง

เลือกกระชายขาวที่มีลักษณะยาวอวบ นำมาล้างทำความสะอาด และนำมาหั่นกึ่งกลางตามแนวยาว นำมาวางบนถาดตะแกรงสำหรับใส่ในตู้อบแห้ง ซึ่งน้ำหนักโดยกำหนดน้ำหนักเริ่มต้นที่ถาดละ 1.5 กิโลกรัม จำนวน 2 ถาด รวม 3 กิโลกรัม มีความสูงของกระชายบนถาดตะแกรง 8 ± 0.5 เซนติเมตร ซึ่งจะใส่ในตู้อบแห้งได้เต็มพอดิ ดังแสดงในรูปที่ 2

2.3 วิธีการทดลอง

ตู้อบแห้งลมร้อนร่วมกับระบบสั่นสะเทือนอัลตราโซนิก มีติดตั้งพัดลมระบายความร้อนให้แก่หัวสั่นสะเทือนอัลตราโซนิก เพื่อลดอุณหภูมิสะสมบนหัวสั่นสะเทือน ซึ่งสามารถลดอุณหภูมิของหัวสั่นได้ประมาณ 8 ± 3 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิห้องอบแห้ง 70 องศาเซลเซียส โดยมีความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที ผ่านท่อระบายความร้อนและมีการควบคุมการเปิดระบบสั่นสะเทือน ทำงานนาน 1 นาที ปิดและเปิดใหม่ทุก ๆ 5 นาที เพื่อยืดอายุการใช้งานของหัวสั่นสะเทือนและแผงวงจรควบคุม

การทดลองอบแห้งกระชายขาวด้วยตู้อบแห้งลมร้อน

และตู้อบแห้งลมร้อนร่วมกับระบบสั่นสะเทือนอัลตราโซนิก ที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ทำการอบแห้งจนกระชายแห้งมีน้ำหนักคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจึงหยุดทำการทดลอง ทำการชั่งน้ำหนัก โดยกระชายแห้งที่ได้ต้องมีความชื้นต่ำกว่า 7 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก อ้างอิงตามมาตรฐาน มผช. ของกระชายดำอบแห้ง จากนั้นนำกระชายขาวที่ผ่านการอบแห้งในแต่ละสภาวะ ออกมาทำการชั่งน้ำหนักและนำมาอบแห้งใหม่อีกครั้งเพื่อหามวลแห้งของกระชายขาว โดยการนำมาอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง (AOAC, 2000) และนำมาคำนวณหาค่าความชื้นของกระชายขาวแห้ง วิเคราะห์ค่าสี ค่าการต้านอนุมูลอิสระ ค่าฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ ฟินอสโตรบิน และแพนคูเรทิน เอ ของกระชายขาวแห้งที่สภาวะต่าง ๆ และทำการเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมกับการอบแห้งต่อปริมาณสารสำคัญในกระชายขาวแห้ง ในสภาวะอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบพหุคูณ (Multivariate Analysis of Variance; MANOVA) และทำการวิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรายคู่โดยใช้วิธีการของ Scheffe ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

2.4 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet Basis) คือ อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในวัสดุต่อน้ำหนักวัสดุ ซึ่งคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ดังสมการที่ (1) [13]

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

2.4.2 ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry Basis) คือ อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในวัสดุต่อน้ำหนักแห้งของวัสดุ ซึ่งคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ดังสมการที่ (2)

$$M_d = \frac{(w-d)}{d} \times 100 \quad (2)$$

โดยที่

w คือ น้ำหนักของวัสดุขึ้น (กิโลกรัม)

d คือ น้ำหนักแห้งของวัสดุ (กิโลกรัม)

2.4.3 อัตราการระเหยน้ำจากการอบแห้ง คือ อัตราส่วนของน้ำที่หายไปเทียบกับเวลา ($\dot{M}_w$) ดังสมการที่ (3)

$$\dot{M}_w = \frac{M_w}{t} \quad (3)$$

โดยที่

M_w คือ น้ำหนักน้ำที่ระเหย (กิโลกรัม)

t คือ เวลา (ชั่วโมง)

2.4.4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตู้อบแห้ง (η) [14] ดังสมการที่ (4)

$$\eta = \frac{\dot{m}h_{fg}}{W_{Hotair-Oven} + W_{Ultrasonic-System}} \quad (4)$$

โดยที่

$\dot{m}$ คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออก (กิโลกรัม)

h_{fg} คือ ค่าเอนทาลปีระหว่างการเปลี่ยนเฟสของน้ำ จากของเหลวกลายเป็นไอ (จูล/กิโลกรัม)

$W_{Hotair-Oven}$ คือ พลังงานไฟฟ้าใช้ในระบบอบแห้ง

ลมร้อน (วัตต์)

$W_{Ultrasonic-System}$ คือ พลังงานไฟฟ้าใช้ในระบบสั่นสะเทือน (วัตต์)

2.4.5 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption; SEC) [15] ดังสมการที่ (5)

$$SEC = \frac{E_{total}}{(M_{in} - M_f) \times W_d} \quad (5)$$

โดยที่

E_{total} คือ พลังงานที่ใช้ในเครื่องอบแห้ง (กิโลวัตต์ชั่วโมง)

M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

M_f คือ ความชื้นสุดท้าย (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

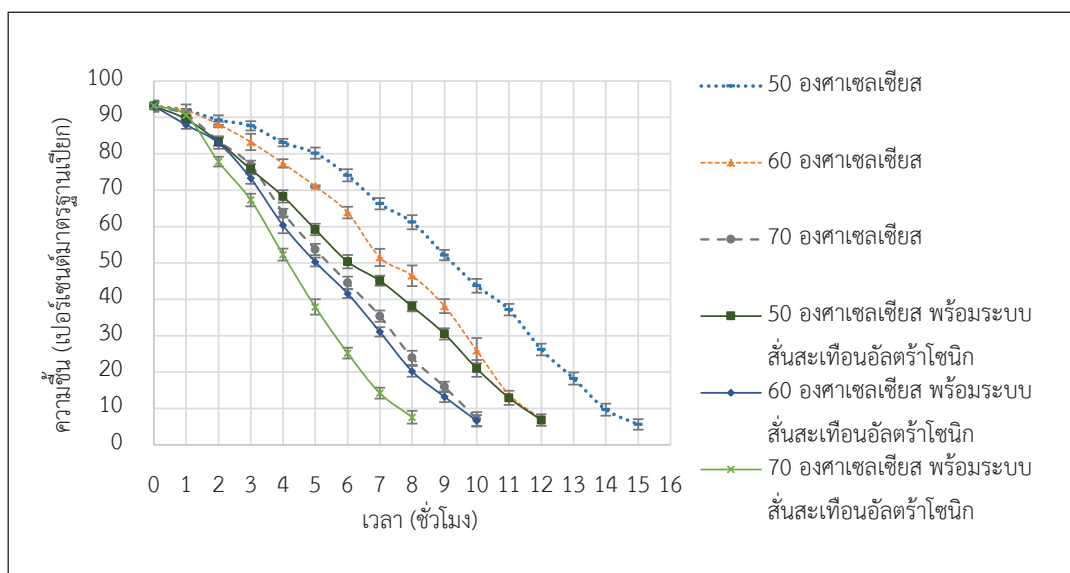
W_d คือ มวลแห้งวัสดุ (กิโลกรัม)

2.5 การวิเคราะห์ค่าสีและสาระสำคัญจากกระชายขาว

2.5.1 สุ่มตัวอย่างกระชายขาวสดและกระชายขาวแห้ง ที่ได้จากการทดลอง 5 ซ้ำ และทำการวัดสีระบบ CIELAB 1976 ด้วย $L^* a^* b^*$ ด้วยเครื่อง 3nh รุ่น NR20XE Hunter Lab โดย L^* แสดงถึงค่าความสว่างขาวถึงดำ a^* แสดงถึงค่าสีแดง และ b^* แสดงถึงค่าสีฟ้าถึงเหลือง [16]

2.5.2 การเตรียมสารละลาย เตรียมกระชายขาวที่ต้องการวิเคราะห์เป็นชิ้นเล็กขนาดไม่เกิน 0.5 เซนติเมตร ชั่งน้ำหนักตัวอย่างละ 10 กรัม เติมน้ำตาล 95 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 30 มิลลิลิตร นำไปสกัดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาสารสำคัญ

2.5.3 การทดลองเพื่อหาปริมาณสารพินอสโตรบิน (Pinostrobin) แพนดูราทิน เอ (Panduratin A) ด้วยเครื่อง Liquid Chromatography-Mass Spectrometer (LC/MS) ยี่ห้อ/รุ่น Agilent Technologies 6490 Triple Quad LC/MS นำสารละลายตัวอย่างที่สกัดได้ในข้อ 2.5.2 ไปวิเคราะห์หาปริมาณสารสำคัญ จะแสดงอยู่ในรูปของ มิลลิกรัมของสารสำคัญต่อปริมาณน้ำหนักระชาย (มิลลิกรัม/กรัม)



รูปที่ 3 กราฟแสดงความขึ้นต่อเวลาเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งลมร้อนและการอบแห้งลมร้อนร่วมระบบอัลตราโซนิก

2.5.4 การหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total Phenolic Compounds) โดยใช้ Folin-Ciocalteu Reagent [17] โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงสีจากปฏิกิริยาของไอออน Mo(VI) แล้วจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ Mo(V) ซึ่งวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 765 นาโนเมตร การวิเคราะห์ปริมาณ Total Phenolics ในสารตัวอย่างจะทำการเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานกรดแกลลิก จะแสดงในรูปของมิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกในตัวอย่างกระชาย 1 กรัม ของสารสกัดด้วยเครื่องไมโครเพลท ยี่ห้อ Metertech รุ่น M965+

2.5.5 การหาปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (Total Flavonoid Compounds) [18] ใช้สารเคอซีทิน (Quercetin) เป็นสารมาตรฐาน วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 415 นาโนเมตร แสดงผลเป็นค่ามิลลิกรัมสมมูลของเคอซีทินในตัวอย่างกระชาย 1 กรัม ของสารสกัดด้วยเครื่องด้วยเครื่องไมโครเพลท

2.5.6 การวิเคราะห์การต้านอนุมูลอิสระ DPPH (DPPH Scavenging Assay) โดยใช้ Trolox เป็นสารมาตรฐาน [18] วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน Trolox และสารสกัดจากกระชายตัวอย่าง คำนวณหาค่า IC50 จากกราฟ

ของร้อยละการกำจัดอนุมูล DPPH และความเข้มข้น

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการทดลองการอบแห้ง

การอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียสด้วยตู้อบแห้งลมร้อนกับตู้อบแห้งลมร้อนร่วมกับระบบสั่นสะเทือนอัลตราโซนิก ทำการทดลองในห้องควบคุมความชื้นอากาศในช่วง 50 ± 5 เปอร์เซ็นต์ และควบคุมการเปิดระบบสั่นสะเทือนอัลตราโซนิกเป็นเวลา 1 นาที เปิด-ปิดทุก ๆ 5 นาที เพื่อป้องกันการสะสมของความร้อนของหัวสั่นสะเทือน

การอบแห้งลมร้อนร่วมกับระบบอัลตราโซนิกสามารถลดระยะเวลาการอบแห้งด้วยลมร้อนปกติได้ประมาณ 2-3 ชั่วโมง ในทุกช่วงอุณหภูมิ โดยความชื้นเริ่มต้นของกระชายขาวที่ใช้ในการอบแห้ง 93 ± 1.5 เปอร์เซ็นต์ มาตรฐานเปียก ความชื้นสุดท้ายหลังการอบแห้งต่ำกว่า 6.7 ± 0.4 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ระยะเวลาการอบแห้งนานที่สุด 15 ± 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ด้วยตู้อบแห้งลมร้อน และอบแห้งเร็วที่สุด 8 ± 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ด้วยตู้อบแห้งลมร้อนร่วมกับระบบสั่นสะเทือนอัลตราโซนิก

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพทางความร้อนและการใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ

สภาวะ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อบแห้งลมร้อน			อบแห้งลมร้อนร่วมระบบอัลตราโซนิก			F (p-value)
	50	60	70	50	60	70	
เวลาในการอบแห้ง (ชั่วโมง)	15.000 ±1.000	12.000 ±0.500	10.000 ±1.000	12.000 ±0.500	10.000 ±1.000	8.000 ±0.500	57.800* (0.000)
อัตราการระเหยน้ำ (กิโลกรัม/ชั่วโมง)	0.170 ±0.01	0.208 ±0.018	0.250 ±0.021	0.208 ±0.015	0.250 ±0.022	0.313 ±0.016	36.520* (0.000)
ประสิทธิภาพทางความร้อน ในการอบแห้ง (เปอร์เซ็นต์)	18.990 ±0.130	19.250 ±0.224	19.750 ±0.154	20.030 ±0.240	20.720 ±0.164	22.100 ±0.120	56.553* (0.000)
การใช้พลังงานจำเพาะ ในการอบแห้ง SEC (กิโลวัตต์ชั่วโมง/กิโลกรัม)	33.500 ±2.160	32.414 ±1.804	32.056 ±1.586	31.296 ±1.552	29.960 ±2.024	28.650 ±1.730	21.525* (0.001)

หมายเหตุ: *มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากตารางที่ 1 อัตราการระเหยน้ำของตู้อบแห้งลมร้อนเปรียบเทียบกับตู้อบแห้งลมร้อนร่วมกับระบบสั่นสะเทือนอัลตราโซนิกพบว่า ระบบสั่นสะเทือนอัลตราโซนิกสามารถกระตุ้นการระเหยน้ำในกระบวนการอบแห้งให้สูงขึ้นได้ โดยอัตราการอบแห้งสูงที่สุด 0.313 ± 0.016 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ในสภาวะการอบแห้งลมร้อนร่วมกับระบบสั่นสะเทือนอัลตราโซนิกที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพทางความร้อนในการอบแห้งมีค่าสูงขึ้นสอดคล้องกับค่าพลังงานที่ใช้สูงขึ้นตามช่วงของอุณหภูมิการอบแห้ง จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพทางความร้อนที่ดีที่สุดคือ 22.10 ± 0.12 เปอร์เซ็นต์ในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมกับระบบสั่นสะเทือนอัลตราโซนิก การใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุดคือ 28.645 ± 1.726 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม ที่การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับระบบอัลตราโซนิกที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัย [8–9] ซึ่งระบบการสั่นสะเทือนอัลตราโซนิกสามารถนำมาใช้ในการช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งได้

3.2 ผลการทดลองการทดสอบปริมาณสารสำคัญของกระชายขาวหลังการอบแห้ง

ตารางที่ 2 แสดงค่าสีของกระชายขาวสดและกระชาย

ขาวแห้งจากการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ พบว่า เมื่อกระชายได้รับความร้อนจะเปลี่ยนสีโดยมีสีที่คล้ำขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น อีกทั้งระยะเวลาในการอบแห้งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้กระชายมีสีที่แตกต่างกัน

ค่า L* แสดงถึงความสว่าง ซึ่งจะมีค่าลดลงตามอุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงขึ้น การอบแห้งลมร้อนร่วมกับระบบสั่นสะเทือนอัลตราโซนิกจะมีสีที่คล้ำน้อยกว่าการอบแห้งลมร้อนเล็กน้อยในทุกอุณหภูมิโดยค่าความสว่างของกระชายขาวสดมีค่าน้อยกว่ากระชายขาวแห้งเนื่องจากกระชายขาวสดมีสีเหลืองอ่อน และเมื่อแห้งแล้วจะมีสีขาวขึ้นบริเวณแกนกลาง

ตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์สารสำคัญในกระชายขาวอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณสารฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ ฟีนอสโตรบิน แพนดราทิน เอ และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH โดยแสดงค่าเป็น IC50 พบว่า กระชายขาวสดมีประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ต่ำที่สุด ในขณะที่การอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีปริมาณสารสำคัญมากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกับกระชายขาวด้วยวิธีอบแห้งลมร้อนร่วมกับระบบอัลตราโซนิกพบว่า สารสำคัญกับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมีค่าสูงกว่าการอบแห้งลมร้อนอย่างเดียวเมื่อเทียบการอบที่อุณหภูมิเดียวกัน

ตารางที่ 2 ค่าสีของกระชายขาวอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ

ค่าสี อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	กระชายสด	อบแห้งลมร้อน			อบแห้งลมร้อนร่วมระบบอัลตราโซนิก			F (p-value)
		50	60	70	50	60	70	
L*	41.170 ±1.106	61.270 ±0.862	59.860 ±2.243	53.360 ±0.322	65.440 ±0.592	64.030 ±2.059	61.220 ±0.427	28.102* 0.000
a*	13.030 ±0.870	17.280 ±1.944	15.690 ±0.712	15.300 ±0.829	16.700 ±0.362	16.230 ±0.573	15.950 ±0.107	20.103* 0.001
b*	25.760 ±1.401	35.060 ±2.170	33.530 ±0.869	30.680 ±1.165	34.800 ±0.699	34.100 ±0.256	33.420 ±0.429	67.456* 0.000

หมายเหตุ: *มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 3 สารสำคัญในกระชายขาวอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ

สภาวะ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	กระชายสด	อบแห้งลมร้อน			อบแห้งลมร้อนร่วมระบบอัลตราโซนิก			F (p-value)
		50	60	70	50	60	70	
ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ IC50 (มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)	0.321 ±0.015	0.057 ±0.012	0.046 ±0.006	0.060 ±0.015	0.039 ±0.011	0.027 ±0.005	0.057 ±0.006	45.384* 0.000
ฟีนอลิก (มิลลิกรัม/กรัม)	3.270 ±0.120	17.240 ±0.220	19.120 ±0.200	16.020 ±0.150	17.460 ±0.320	20.390 ±0.150	16.170 ±0.250	49.088* 0.000
ฟลาโวนอยด์ (มิลลิกรัม/กรัม)	3.740 ±0.150	28.290 ±0.140	39.620 ±0.028	23.880 ±0.052	28.970 ±0.025	39.910 ±0.015	22.240 ±0.120	87.255* 0.000
ฟีนอสโตรปี (มิลลิกรัม/กรัม)	7.320 ±0.150	72.260 ±0.220	68.810 ±0.260	57.530 ±0.310	98.670 ±0.250	97.930 ±0.220	60.170 ±0.320	94.118* 0.000
แพนดราทินเอ (มิลลิกรัม/กรัม)	6.920 ±0.240	58.350 ±0.310	59.250 ±0.270	45.820 ±0.220	83.270 ±0.420	82.170 ±0.360	46.740 ±0.220	37.952* 0.000

หมายเหตุ: *มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

4. อภิปรายผลและสรุป

ตูบแห้งลมร้อนร่วมกับระบบสันสะเทือนอัลตราโซนิก ที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรได้เป็นอย่างดี ระบบสันสะเทือนอัลตราโซนิกสามารถนำมาใช้ในการช่วยการกระตุ้นน้ำออกจากเซลล์ของผลผลิตทางการเกษตรได้ดีขึ้น ทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อน ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่า สามารถลดระยะเวลาการอบแห้งกระชายขาวได้ 2-3 ชั่วโมง และมีอัตราการระเหยน้ำ ค่าการใช้พลังงานที่ใช้ต่อการผลิต และประสิทธิภาพทางความร้อนในการอบแห้งที่สูงขึ้น โดยการทดลองการอบแห้ง

ลมร้อนร่วมระบบสันสะเทือนอัลตราโซนิกที่ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าอัตราการระเหยน้ำ ประสิทธิภาพทางความร้อนในการอบแห้ง และการใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้ง ดีขึ้นกว่าการอบแห้งลมร้อน ที่ 0.063 กิโลกรัม/ชั่วโมง 2.350 กิโลวัตต์ชั่วโมง/กิโลกรัม และ 3.411 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม การเลือกสภาวะที่ดีที่สุดนั้นพิจารณาผลการทดสอบด้านคุณภาพผลิตภัณฑ์ คือ ผลต่อสีและสารสำคัญในกระชายขาวพบว่า การอบแห้งลมร้อนร่วมระบบสันสะเทือนอัลตราโซนิกที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมโดยมีปริมาณสารสำคัญรวมมากที่สุด

โดยมีอัตราการระเหยน้ำ ประสิทธิภาพทางความร้อนในการอบแห้ง และการใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้งที่ 0.250 กิโลกรัม/ชั่วโมง 20.72 เปอร์เซ็นต์ และ 29.960 กิโลวัตต์ ชั่วโมง/กิโลกรัม ตามลำดับ อีกทั้งอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบแห้งที่มากขึ้น ส่งผลต่อปริมาณสารสำคัญซึ่งสอดคล้องกับบทความความวิจัยของสุกัญญาและคณะ [19] และของกิน และคณะ [20] ซึ่งฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้นเพราะจะสลายตัวได้ง่ายด้วยความร้อน [21] เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระจะลดลง การเปลี่ยนแปลงนี้มีความสัมพันธ์กับปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ โดยเฉพาะสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ ซึ่งเป็นสารหลักที่มีบทบาทในการยับยั้งอนุมูลอิสระในพืช [19] อุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลต่อพันธะของกรดฟีนอลิกกับโปรตีนหรือสารอื่น ๆ เกิดการสลายตัว ทำให้โครงสร้างของกรดฟีนอลิกเปลี่ยนแปลง การตอบสนองต่ออุณหภูมิขึ้นอยู่กับรูปแบบของสารประกอบฟีนอลิกในตัวอย่าง โดยสารประกอบฟีนอลิกในรูปแบบที่เชื่อมโยงกับองค์ประกอบอื่น ๆ จะมีการเสื่อมสภาพมากกว่าสารประกอบฟีนอลิกในรูปแบบอิสระ เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก [22] และปริมาณ ฟลาโวนอยด์ทั้งหมดในการวิเคราะห์จะมีปริมาณลดลงเช่นเดียวกับปริมาณฟีนอลิก โดยขึ้นอยู่กับชนิดของฟลาโวนอยด์ที่มีการสลายตัวที่อุณหภูมิแตกต่างกัน บางชนิดทนต่ออุณหภูมิสูง แต่บางชนิดสลายตัวที่อุณหภูมิสูงทำให้ปริมาณฟลาโวนอยด์ลดลง [23] แต่เมื่อเทียบกันระหว่างทั้งการอบแห้งลมร้อนกับการอบแห้งลมร้อนพร้อมระบบสั่นสะเทือนที่อุณหภูมิเดียวกันพบว่า การอบแห้งลมร้อนพร้อมระบบสั่นสะเทือนมีสารสำคัญในกระชายขาวมากกว่า เนื่องจากการอบแห้งลมร้อนพร้อมระบบสั่นสะเทือนอาจส่งผลให้โครงสร้างของผนังเซลล์เกิดการสลาย จึงเกิดการปลดปล่อยฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระและสารต่าง ๆ ออกมามากขึ้น [24] แต่เมื่อเทียบกับกระชายสดและกระชายอบแห้ง กระชายสดมีปริมาณสารสำคัญน้อยกว่าเนื่องจากกระชายสดมีปริมาณ

น้ำในเนื้อจำนวนมาก การทำให้กระชายแห้งจึงส่งผลต่อความเข้มข้นของปริมาณสารสำคัญของสารต่าง ๆ ดังนั้นตู้อบแห้งลมร้อนร่วมกับระบบสั่นสะเทือนนี้เหมาะสำหรับการนำไปใช้ต่อยอดในอุตสาหกรรมการอบแห้งสมุนไพรที่ต้องการรักษาสารสำคัญไว้ จะมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นและใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งลมร้อนโดยทั่วไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่สนับสนุนทุนวิจัย และคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ ที่อนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือ และขอบคุณผู้ร่วมวิจัยทุกท่าน

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Saeed, A. Naim, and P. Tariq, "In vitro antibacterial activity of peppermint," *Pakistan Journal of Botany*, vol. 38, no. 3, pp. 869–872, 2006.
- [2] T. Pennapa, "Study of local herbal plants and folk wisdom for wage: Case study: Kaeng Krung National Park, Suratthani Province," M.S. thesis, Department of Environmental Management, Prince of Songkhla University, 2016 (in Thai).
- [3] T. Rongdet, "Antibacterial activity of extracts substance from some Zingiberaceae against *Streptococcus pyogenes*," Research report of Faculty of Science, Naresuan University, 2013 (In Thai).
- [4] *Ultrasound in Food Processing*, T.J. Eds., Blackie Academic and Professional: London, 1998, pp. 105–126.
- [5] D. J. McClements, "Ultrasonic characterization of foods and drinks: principles, methods, and



- application,” *Critical Reviews In Food Science and Nutrition*, vol. 37, no. 1, pp. 1–46, 1997.
- [6] A.Mizrach, N.Galili, and G.Rosenhouse, “Determining quality of fresh products by ultrasonic excitation,” *Food Technology*, vol. 48, pp. 68–71. 1994.
- [7] A.William, “New technologies in food preservation and processing: Part II,” *Nutrition & Food Science*, vol. 94, no. 1, pp. 20–23, 1994.
- [8] P. Thanompongchart, P. Pintana, T. Tagoon, and N. Tippayawong, “Effect of ultrasonic vibration on pineapple drying,” in *Proceeding The 3rd International Conference on Energy and Power*, 2021, pp. 1–5.
- [9] P.Thanompongchart, P. Pintana, and N. Tippayawong, “Thermal performance enhancement in hot air and solar drying of pineapple slices with ultrasonic vibration,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 37, pp. 1–5, 2022.
- [10] M. J. W. Povey, “Ultrasonics in food engineering. Part II : Applications,” *Journal of Food Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 1–20, 1989.
- [11] F. J. Sala, J. Burgos, S. Condon, P. Lopez, and J. Raso, “Effect of heat and ultrasound on microorganisms and enzymes,” in *New methods of food preservation*, Glasgow, G. W. Gould (ed.) Blackie Academic & Professional, pp. 176–204, 1995.
- [12] H. Bozkir and A. R. Ergün, “Effect of sonication and osmotic dehydration applications on the hot air-drying kinetics and quality of persimmon,” *Lwt-Food Science and Technology*, vol. 131, 2020.
- [13] V. Rungsardthong, *Food Processing Technology*, 2nd ed. Bangkok: KMUTNB Textbook Publishing Center, 2002 (in Thai).
- [14] P. Thanompongchart, P. Pintana, and N. Tippayawong, “Improving solar dryer performance with automatic control of auxiliary heated air,” *Energy Report*, vol. 9, pp. 109–113, 2023.
- [15] S. Jakhom, “Fruit and herb drying using combined techniques of heat pump and far-infrared radiation,” M.S. Thesis, Department of Energy Technology, King Mongkut’s University of Technology Thonburi, 2003 (in Thai).
- [16] *CIE 15.2: 1986 Colorimetry*, 2nd ed The International Commission (CIE), Vienna, 1986.
- [17] W. Chomkitichai, “Effect of salinity stress on seed germination and antioxidant activities of germinated cereal grains,” *PSRU Journal of Science and Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 40–55, 2023 (in Thai).
- [18] A. S. N. Formagio, C. R. F. Volobuff, M. Santiago, C. A. L. Cardoso, M. D. C. Vieira, and Z. V. Pereira, “Evaluation of antioxidant activity, total flavonoids, tannins and phenolic compounds in psychotria leaf extracts,” *Antioxidants*, vol. 3, no. 4, pp. 745–757, 2014.
- [19] S. Jansuna, L. Charoensup, Y. Jirakiattikul, and B. Harakotr, “Effects of drying temperatures and times on antioxidant contents and their activities of *Centella asiatica* (L.) Urb. leaves,” *Thai Science and Technology Journal*, vol. 28, no. 12, pp. 2261–2272, 2020 (in Thai).
- [20] K. Sooksing and W. Jirapakkul, “Effect of drying on flavonoid content and antioxidant capacity in fingerroots (*Boesenbergia pandurata*),”



- in *Proceeding The 49th Kasetsart University Annual Conference*, 2011, pp. 641–648 (in Thai).
- [21] S. Chinnasarn, W. Yuenyongputtakal, N. Krasae chol, M. Khaenman, and A. Chalongsan, “Effect of processing on antioxidant activity of bustard cardamom powder,” *Huachiew Chalermprakiet Science and Technology Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 41–51, 2019 (in Thai).
- [22] M. A. Martin-Cabrejas, Y. Aguilera, M. M. Pedrosa, C. Cuadrado, T. Hernandez, S. Diaz, and R. M. Esteban, “The impact of dehydration process on antinutrients and protein digestibility of some legume flours,” *Food Chemistry*, vol. 114, pp. 1063–1068, 2009.
- [23] P. C. H. Hallam, “Evidence for health benefits of plant phenols: Local or systemic effects,” *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 81, no. 9, pp. 842–852, 2001.
- [24] S. Ruangsawang, and H. Niamsup, “Antioxidant activity of galangal: Effects of cooking methods,” in *Proceedings The 7th International Conference on Biochemistry and Molecular Biology*, 2021, pp. 1–7.

