

การประยุกต์ใช้ห้องอบแห้งแบบท่อเทอร์โมไซฟอนร่วมกับ พลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเตาเผาถ่าน

Application of a Thermosiphon-Tube Drying Chamber with Waste Heat from a Charcoal Kiln

กัณฑ์ณ เปรมประยูร*, เกียรติพล นามนต์ดี, ภาณุวัตร ศรีมูลลาด, สหสวรรษ ทิวเอื้อง
Kantapon Premprayoon*, Kiattipol Nammonde, Panuwat Srimoonlad, Sahatsawat Tiwhueang
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ขอนแก่น ประเทศไทย
Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus,
Khon Kaen, Thailand
ศิวกร โนนสว่าง

Siwakorn Nonsawang
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น ประเทศไทย
Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

* Corresponding author E-mail: kantapon.pr@muti.ac.th

Received 14 March 2025; Revised 22 August 2025; Accepted 28 August 2025

บทคัดย่อ

ความเป็นมาและวัตถุประสงค์: ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน และความยั่งยืนเป็นประเด็นสำคัญในภาคเกษตรกรรม และอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการผลิตถ่าน ซึ่งมีการสูญเสียความร้อนจำนวนมาก การนำความร้อนดังกล่าวกลับมาใช้ใหม่ เช่น ในกระบวนการอบแห้ง ซึ่งมักประสบปัญหาด้านประสิทธิภาพ นำไปสู่การใช้พลังงานที่สูงและระยะเวลาการอบแห้งที่ยาวนาน นับเป็นแนวทางการแก้ปัญหาหนึ่งที่น่าสนใจ การศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาและประยุกต์ใช้ห้องอบแห้งแบบเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ความร้อนเหลือทิ้งจากเตาเผาถ่านเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง โดยระบบอบแห้งแบบเทอร์โมไซฟอนดึงความร้อนโดยตรงจากเตาเผาถ่านและถ่ายเทไปยังห้องอบแห้งอย่างมีประสิทธิภาพ การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ออกแบบและพัฒนาห้องอบแห้งแบบเทอร์โมไซฟอน (2) ประเมินประสิทธิภาพการกระจายความร้อนและผลกระทบต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ การศึกษานี้ยังตรวจสอบศักยภาพของเทคโนโลยีเทอร์โมไซฟอนในการปรับปรุงสภาพการอบแห้งให้เหมาะสม เพื่อให้มั่นใจถึงการอนุรักษ์พลังงานที่ดีขึ้นในขณะที่ยังคงความสมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์

วิธีดำเนินการวิจัย : การศึกษานี้เกี่ยวข้องกับการออกแบบและพัฒนาห้องอบแห้งแบบเทอร์โมไซฟอน ซึ่งประกอบด้วยห้องอบแห้งและห้องเผาไหม้ ระบบเทอร์โมไซฟอนใช้ท่อความร้อนสแตนเลส 30 ท่อที่บรรจุสารทำความเย็น R-134a เป็นของเหลวทำงาน เพื่ออำนวยความสะดวกในการถ่ายเทความร้อนแบบพาสซีฟ ใช้ไขมันสดเป็นวัสดุทดลอง โดยหั่นเป็นชิ้นที่มีความหนาต่าง ๆ (2 4 และ 6 มม.) ประเมินประสิทธิภาพการอบแห้งโดยการวัดการสูญเสียความชื้น ค่ากิจกรรมของน้ำ (aw) และการเปลี่ยนแปลงสีในช่วงเวลา 90, 120 และ

150 นาที นอกจากนี้ยังวัดประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกักเก็บความร้อนของระบบกับห้องอบแห้งแบบดั้งเดิม

ผลการวิจัย : การอบแห้งขมิ้นด้วยระบบเทอร์โมไซฟอน (TS) ช่วยเพิ่มการสูญเสียความชื้นจาก 64.97% (No TS) เป็น 80.43% ที่เวลาอบ 90 นาที (ความหนา 2 มม.) และลดค่า aw จาก 0.91 เหลือ 0.75 ในเวลาเดียวกัน การเพิ่มเวลาอบเป็น 150 นาที ทำให้ค่า aw ลดลงต่อเนื่องถึง 0.63 (TS) ขณะที่ No TS ยังสูงที่ 0.87 ในการเปรียบเทียบความเป็นไปได้เชิงสมมติฐาน ระบบ TS อบได้ 2 รอบ/วัน เทียบกับ 1 รอบของ No TS ทำให้อบขมิ้นสดได้เพิ่มจาก 10 กก./วัน เป็น 20 กก./วัน และให้ผลผลิตขมิ้นแห้งเพิ่มจาก 1.8 กก./วัน เป็น 3.6 กก./วัน รายได้รวมเพิ่มจาก 270 เป็น 540 บาท/วัน แม้ต้นทุนเริ่มต้นของ TS สูงกว่า (9,000 บาท เทียบกับ 6,000 บาท) แต่แสดงศักยภาพสูงในการเพิ่มผลผลิตและรายได้

สรุป : ตู้อบแบบเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ความร้อนเหลือทิ้งจากเตาเผาถ่านสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและลดเวลาอบแห้งขมิ้นได้ดีกว่าระบบทั่วไป อย่างไรก็ตาม ค่า aw ที่ยังเกินเกณฑ์ความปลอดภัยแสดงให้เห็นข้อจำกัดของระบบกับขมิ้นชัน แต่เทคโนโลยีนี้อาจเหมาะสมกับสมุนไพรชนิดอื่นที่มีโครงสร้างต่างออกไป การควบคุมอุณหภูมิและทิศทางลมเป็นสิ่งที่ควรปรับปรุงเพิ่มเติม ระบบนี้มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในระดับครัวเรือนถึงอุตสาหกรรม และสามารถช่วยลดการพึ่งพาพลังงานดั้งเดิมในการแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตรได้

การนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงปฏิบัติ : ระบบอบแห้งแบบเทอร์โมไซฟอนสามารถนำไปผสมรวมเข้ากับการปฏิบัติงานอบแห้งทางการเกษตรและอุตสาหกรรม เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงพลังงานและลดต้นทุนการดำเนินงาน ความสามารถในการใช้ความร้อนเหลือทิ้งจากเตาเผาถ่านทำให้ระบบนี้เป็นทางเลือกที่ยั่งยืนสำหรับการแปรรูปหลังการเก็บเกี่ยว ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อเกษตรกรและผู้ผลิตรายย่อย นอกจากนี้ การออกแบบที่ต้องการการบำรุงรักษาน้อยและลดการพึ่งพาองค์ประกอบความร้อนจากไฟฟ้า ทำให้เป็นทางเลือกที่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจสำหรับพื้นที่ห่างไกลและมีทรัพยากรจำกัด

คำสำคัญ : เทอร์โมไซฟอน, ตู้อบแห้ง, ความร้อนเหลือทิ้ง, การอบแห้งขมิ้น, ประสิทธิภาพพลังงาน

Abstract

Background and Objectives: Energy efficiency and sustainability are key issues in agriculture and industry, particularly in charcoal production processes where a large amount of heat is wasted. Recovering and reusing the heat in such processes as drying, which often face a problem related to energy efficiency, leading to high energy consumption and long drying time, represents an interesting alternative to the problem. The present study focused on the development and application of a thermosyphon drying chamber that utilizes waste heat from a charcoal kiln to improve the drying efficiency. The thermosyphon drying system drew heat directly from the kiln and effectively transferred it to the drying chamber. The

objectives of this research were: (1) to design and develop a thermosyphon drying chamber and (2) to evaluate the heat distribution efficiency and its effects on product quality. The study also examined the potential of thermosyphon technology to optimize drying conditions, ensuring better energy conservation while maintaining product integrity.

Methodology: The study involved the design and development of a thermosyphon drying chamber, which consists of a drying compartment and a combustion chamber. The thermosyphon system used 30 stainless steel heat pipes filled with R134a refrigerant as the working fluid to facilitate passive heat transfer. Experiments were conducted using fresh turmeric as the test material; turmeric was made into slices of different thicknesses (2, 4, and 6 mm). The drying efficiency was assessed by measuring moisture loss, water activity (a_w) and color changes at 90, 120 and 150 min. Thermal efficiency measurement was also made to compare the heat retention capacity of the system with that of a conventional drying chamber.

Main Results: Drying turmeric using the thermosyphon (TS) system increased moisture loss from 64.97% (No TS) to 80.43% at 90 min of drying (2 mm thickness) and reduced water activity (a_w) from 0.91 to 0.75 at the same time. Extending the drying time to 150 min further decreased a_w to 0.63 (TS), while in the No TS system it remained higher at 0.87. In a hypothetical feasibility comparison, TS system enabled 2 drying cycles per day, compared to 1 cycle in the case of No TS, thereby increasing the amount of fresh turmeric that can be processed in a day from 10 kg/day to 20 kg/day; these amounts resulted in the increased yield of dried turmeric from 1.8 kg/day to 3.6 kg/day. The total income increased from 270 to 540 baht/day. Although the initial cost of the TS system was higher (9,000 Baht compared to 6,000 Baht), TS system demonstrates strong potential for increasing productivity and income.

Conclusions: Thermosyphon drying chamber utilizing waste heat from a charcoal kiln could enhance the heat transfer efficiency and reduce the drying time of turmeric more effectively than a conventional system. However, a_w values that still exceeded the safety threshold highlight the limitation of the system for turmeric drying. Nevertheless, the technology may be more suitable for other herbs with different structural characteristics. Improvements in temperature and airflow control are recommended. The system shows potential for applications ranging from household to industrial scale and could help reduce the reliance on conventional energy sources in the processing of agricultural products.

Practical Application: Thermosyphon drying system can be integrated into agricultural and industrial drying operations to improve energy efficiency and reduce operating costs. The

ability to utilize waste heat from a charcoal kiln makes it a sustainable option for postharvest processing, benefiting farmers and small-scale producers. Furthermore, its low-maintenance design and reduced reliance on electric heating make it an economically viable choice for remote areas with limited resources. Additionally, the low-maintenance design and reduced dependency on electrical heating elements make it an economically viable solution for remote and resource-limited areas.

Keywords: Thermosiphon, Drying Chamber, Waste Heat, Turmeric Drying, Energy Efficiency

Introduction

ประสิทธิภาพการใช้พลังงานและความยั่งยืนได้กลายเป็นประเด็นสำคัญในระดับโลก โดยเฉพาะในภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม ซึ่งต้องใช้พลังงานในปริมาณมาก กระบวนการผลิตแบบดั้งเดิมหลายอย่างมักก่อให้เกิดความร้อนส่วนเกินที่สูญเปล่า ซึ่งส่งผลให้เกิดการสูญเสียประโยชน์จากพลังงานความร้อนที่เหลือใช้ตัวอย่างหนึ่งคืออุตสาหกรรมการผลิตถ่าน ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหลักสำหรับประชากรโลกประมาณหนึ่งในสาม โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนา [1] กระบวนการผลิตถ่านสร้างความร้อนที่จำนวนมาก ซึ่งโดยทั่วไปจะถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยไม่ได้รับการนำไปใช้ประโยชน์เพิ่มเติม ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา นักวิจัยได้ศึกษาวิธีการดักจับและนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงโดยรวม [2-3]

เทคโนโลยีท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนได้กลายเป็นทางออกที่มีแนวโน้มสำหรับการถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพและการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ เทอร์โมไซฟอนเป็นอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนแบบพาสซีฟที่ใช้หลักการเปลี่ยนสถานะเพื่อเคลื่อนย้ายความร้อนจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้ปั๊มเชิงกล [4] ระบบนี้อาศัยการพาความร้อนผ่านการระเหยและควบแน่นของของไหลในท่อปิดผนึก โดยใช้ความร้อนแฝงในการถ่ายเทความร้อนได้มาก แม้มีความต่างของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย ทำให้จัดการความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงาน [5] เนื่องจากมีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือสูง เทอร์โมไซฟอนจึงถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ รวมถึงการระบายความร้อนทางอิเล็กทรอนิกส์ [6] พลังงานแสงอาทิตย์ [7] และการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่

ในบริบทของการแปรรูปทางการเกษตร การอบแห้งเป็นกระบวนการที่สำคัญซึ่งช่วยให้งานนี้มั่นคงได้ถึงการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ ปรับปรุงคุณภาพ และลดการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยว วิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิม เช่น การอบแห้งด้วยแสงแดดโดยตรง มักประสบปัญหา และยังมีข้อจำกัด เช่น การกระจายความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอ ระยะเวลาการอบแห้งที่ยาวนาน การระบาดของศัตรูพืช และความล่าช้าในการผลิตทางการเกษตรแบบอุตสาหกรรม [8-9] ส่วนการอบแห้งด้วยลมร้อนแบบทั่วไป เวลาในการประมวลผลนาน และต้นทุนพลังงานสูง [10] He และคณะ [11] ได้รายงานถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ดีเยี่ยม (266.7 W/cm^2) เมื่อใช้ระบบเทอร์โมไซฟอนแบบห้ว การบูรณาการท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนเข้ากับระบบอบแห้ง ทำให้สามารถ

กระจายความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอ ปรับปรุงประสิทธิภาพการอบแห้ง และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน แนวทางนี้มีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับเกษตรกรรายย่อยและอุตสาหกรรมการเกษตร ซึ่งต้นทุนพลังงานอาจเป็นภาระสำคัญได้

แม้ว่าจะมีการศึกษาระบบเทอร์โมไซฟอนในด้านความร้อนค่อนข้างมาก แต่การนำมาประยุกต์ใช้กับความร้อนที่ทิ้งจากเตาเผาถ่านโดยเฉพาะยังคงมีข้อมูลที่จำกัดอยู่ การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาและการประยุกต์ใช้ตู้อบแบบท่อเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ความร้อนทิ้งจากเตาเผาถ่านเพื่อปรับปรุงกระบวนการอบแห้ง วัตถุประสงค์หลักของการวิจัยนี้คือ (1) การออกแบบและพัฒนาห้องอบแห้งแบบเทอร์โมไซฟอน (2) ประเมินประสิทธิภาพของตู้อบแบบท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนในการกระจายความร้อน การตรวจสอบประเด็นเหล่านี้ การศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อสนับสนุนความก้าวหน้าของเทคโนโลยีการอบแห้งที่ยั่งยืน และส่งเสริมการนำทางเลือกการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมาใช้ในการเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม

Materials and Methods

การวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้ตู้อบแบบท่อเทอร์โมไซฟอนร่วมกับพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเตาเผาถ่าน โดยผู้วิจัยได้ดำเนินงานตามกระบวนการวิจัยและพัฒนา ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการดำเนินงานและรายละเอียดดังต่อไปนี้

การออกแบบและพัฒนาตู้อบแบบเทอร์โมไซฟอน

ในการออกแบบตู้อบแบบท่อเทอร์โมไซฟอน ได้ใช้คอมพิวเตอร์ และโปรแกรม SolidWorks ในการสร้างแบบจำลองสามมิติของชิ้นส่วนต่าง ๆ เพื่อให้สามารถกำหนดขนาดและตำแหน่งของห้องอบและห้องเผาไหม้ได้อย่างเหมาะสมต่อการถ่ายเทความร้อน โดยอิงตามหลักการของการพาความร้อนตามธรรมชาติ (natural convection) และการนำความร้อนผ่านท่อโลหะ (thermal conduction) ซึ่งเป็นกลไกสำคัญของระบบถ่ายเทความร้อนในท่อเทอร์โมไซฟอน ตู้อบแบบเทอร์โมไซฟอนประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 6 ส่วน โดยมีรายละเอียดองค์ประกอบดังนี้ (Figure 1)

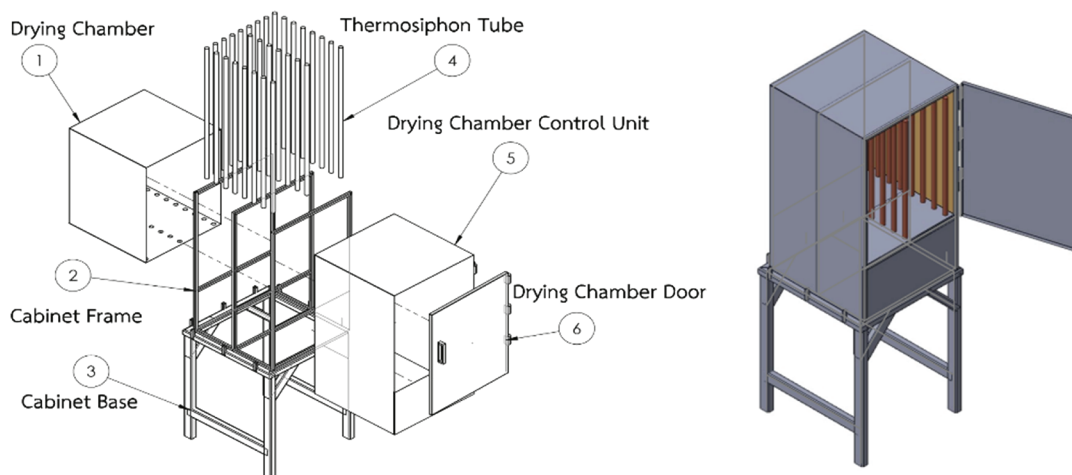


Figure 1 Thermosiphon drying chamber design

1. ห้องอบ (Drying Chamber) ทำหน้าที่เป็นพื้นที่หลักสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ โดยออกแบบให้มีขนาดเหมาะสมต่อปริมาณวัสดุที่ต้องการอบ และใช้วัสดุแผ่นเหล็กไร้สนิม (Stainless Steel 304) เพื่อความปลอดภัยต่อผู้บริโภคและป้องกันการเกิดสนิมจากไอน้ำที่เกิดขึ้นภายในระบบ

- ขนาด: กว้าง 600 มม. × สูง 750 มม.
- วัสดุ: แผ่นเหล็กไร้สนิม (Stainless Steel) มาตรฐาน 304 ความหนา 0.8 มม.
- ฟังก์ชัน: เป็นพื้นที่หลักสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์
- การออกแบบ: คำนึงถึงความปลอดภัยของผู้บริโภคเป็นหลัก

2. โครงสร้างตู้ (Cabinet Frame) ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างรับแรงหลักของตู้ ประกอบด้วยเหล็กกล่องเชื่อมต่อกันอย่างแข็งแรง พร้อมหุ้มภายนอกด้วยเหล็กแผ่นขึ้นรูปเพื่อให้เหมาะสมกับการติดตั้งและรองรับการใช้งานในระยะยาว

- วัสดุ: เหล็กกล่องขนาด 1×1 นิ้ว
- การประกอบ: เชื่อมต่อกันเพื่อให้เข้ากับชุดห้องอบ
- การติดตั้ง: ยึดติดด้วยสกรู
- การหุ้มภายนอก: ใช้เหล็กแผ่นความหนา 1 มม. ตัดพับทำเป็นรูปทรงเข้ากับโครงสร้าง

3. ฐานตู้ (Cabinet Base) ทำหน้าที่รองรับน้ำหนักทั้งหมดของตู้ ช่วยเพิ่มความมั่นคงของโครงสร้าง และลดการสั่นสะเทือนระหว่างการใช้งาน โดยใช้เหล็กกล่องประกอบเข้าด้วยกันเพื่อเพิ่มความแข็งแรง

- วัสดุหลัก: เหล็กกล่องขนาด 1 นิ้ว × 2 นิ้ว ความหนา 1 มม.
- วัสดุเสริม: เหล็กกล่องขนาด 1×1 นิ้ว
- ฟังก์ชัน: รองรับน้ำหนักทั้งหมดของตู้และให้ความมั่นคงในการใช้งาน

4. ท่อเทอร์โมไซฟอน (Thermosiphon Tube) ทำหน้าที่เป็นกลไกถ่ายเทความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อน (ห้องเผาไหม้) ไปยังห้องอบ โดยภายในท่อประกอบด้วยส่วนระเหยและส่วนควบแน่น ซึ่งทำงานร่วมกับสารทำงาน (R-134a) เพื่อถ่ายเทความร้อนผ่านกลไกการหมุนเวียนตามธรรมชาติโดยไม่ใช้ปั๊มหรือระบบไฟฟ้า

- จำนวน: 30 ท่อ
- วัสดุ: ท่อเหล็กไร้สนิม (Stainless Steel) มาตรฐาน 304 (AISI 304)
- ขนาด: เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 25.4 มม. หนา 1.5 มม.
- โครงสร้างภายใน: แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนทำระเหย ความยาว 300 มม. และส่วนควบแน่น ความยาว 700 มม.

- ระบบเติมสารทำความร้อน: ใช้ครีเดมสารน้ำยาแอร์ จำนวน 30 คร. เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม.

5. ชุดควบคุมห้องอบ (Drying Chamber Control Unit) ทำหน้าที่ควบคุมระบบการทำงานภายในห้องอบ เช่น การตรวจวัดอุณหภูมิหรือควบคุมการเปิด-ปิดระบบตามเงื่อนไขที่กำหนด เชื่อมต่อกับระบบท่อเทอร์โมไซฟอนเพื่อให้ควบคุมได้ตรงตามกลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจริง

- ฟังก์ชัน: ควบคุมการทำงานของระบบอบแห้ง
- ตำแหน่งติดตั้ง: ด้านข้างของตู้อบ
- การเชื่อมต่อ: เชื่อมต่อกับระบบท่อเทอร์โมไซฟอน

6. ประตูห้องอบ (Drying Chamber Door) ทำหน้าที่ป้องกันความร้อนสูญเสียออกจากห้องอบ และเป็นทางเข้า-ออกสำหรับจัดการวัสดุที่ต้องการอบ ใช้โครงสร้างสองชั้นเพื่อรักษาอุณหภูมิภายใน โดยมีระบบล็อกและที่จับที่ใช้งานง่าย และสามารถปิดได้อย่างแน่นหนา

- ประตูด้านนอก: เหล็กหนา 1 มม.
- ประตูด้านใน: แผ่นเหล็กไร้สนิมมาตรฐาน 304
- ระบบประตู: ติดตั้งประตูพับ 3 ชุด
- อุปกรณ์เสริม: ที่จับเปิด-ปิด 1 ตัว และกลอนล็อก 2 ตัว

หลักการทำงาน

ระบบเทอร์โมไซฟอนทำงานโดยอาศัยหลักการพาความร้อนแบบธรรมชาติ โดยของเหลวในท่อจะระเหยที่ส่วนทำระเหยและควบแน่นที่ส่วนควบแน่น ก่อให้เกิดการหมุนเวียนความร้อนอย่างต่อเนื่อง เหมาะสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ อย่างสม่ำเสมอและประหยัดพลังงาน

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

เตาเผาถ่านใช้ขนาด 200 ลิตร ทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานความร้อนสำหรับเตาอบท่อเทอร์โมไซฟอน โดยพลังงานความร้อนจะถูกส่งไปยังห้องเผาไหม้เพื่อทำการระเหยท่อเทอร์โมไซฟอนที่ใช้สารทำความเย็น R-134a และตู้เปล่าในการทำความร้อนภายในห้องอบ เตาเผาถ่านมีขนาด 200 ลิตรแบบแนวนอน ซึ่งไม่

มะขามเป็นวัตถุดิบที่นำมาทดลองประมาณ 80-100 กิโลกรัมต่อครั้ง และวัตถุดิบที่ใช้สำหรับทดลองในตู้อบ คือ ขมิ้นชันสด ทำให้เป็นชิ้นที่มีความหนา 3 ขนาด ได้แก่ 2 4 และ 6 มม. [12]

การประเมินการวัดความชื้นใช้เครื่องอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง การวัดค่า Aw ใช้เครื่องวัดค่าปริมาณน้ำอิสระแบบพกพา (Digital and Portable Water Activity Meter) รุ่น WA-160A และการวัดคุณภาพค่าสีใช้เครื่องวัดสี AMT500: Colorimeter (Color Difference Meter) โดยเครื่องมือทั้งหมดได้รับการสอบเทียบก่อนการใช้งาน

การศึกษาประสิทธิภาพของตู้อบแบบท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนในการกระจายความร้อน

1. การเลือกสารทำงาน เลือกสารทำงานที่ปลอดภัยและไม่มีผลข้างเคียงต่อมนุษย์ โดยเลือกสารที่เหมาะสมกับช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองและช่วยในการถ่ายเทความร้อนได้ดี สารทำงานจะต้องมีระยะเวลาใช้งานยาวนานและสามารถเก็บรักษาได้ง่าย ในการทดลองนี้เลือกใช้สารทำงานในปริมาณร้อยละ 80 ของปริมาตรภายในส่วนระเหย ซึ่งเป็นการออกแบบที่คำนึงถึงสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์และประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน โดยใช้สารทำความเย็น R-134a ซึ่งเป็นสารที่มีจุดเดือดต่ำที่ -26.1 °C ทำให้เหมาะสมต่อการใช้งานในระบบท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน เนื่องจากสามารถระเหยและควบแน่นได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ช่วงอุณหภูมิการทดลอง และเนื่องจาก R-134a ไม่มีผลกระทบต่อการทำลายชั้นโอโซน และเป็นสารที่ปลอดภัย ไม่มีพิษ และไม่ติดไฟ อย่างไรก็ตาม การใช้งานในปริมาณจำกัดและระบบปิด เช่น ในการทดลองนี้จะช่วยลดความเสี่ยงต่อการรั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อมได้ในระดับหนึ่ง [13]

2. การจัดเตรียมตู้อบและเตาเผาถ่าน ตั้งตู้อบไว้กลางช่องไฟของเตาเผาถ่าน เพื่อให้ความร้อนจากเตาเผาถ่านกระจายทั่วทั้งห้องเผาไหม้ของตู้อบเทอร์โมไซฟอน โดยจะทำการทดสอบ 2 รูปแบบ ดังนี้

- อบด้วยตู้อบเปล่า (ไม่มีท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน)
- อบด้วยตู้อบที่ติดตั้งท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนและเติมสารทำงาน R-134a

3. การเริ่มการทดสอบ จุดเตาเผาถ่านและให้เวลาในการทำงานจนความร้อนเสถียร เมื่อถ่านจุดติดได้เองสมบูรณ์ (สังเกตจากเปลวไฟ) ดัง Figure 2a จากนั้นทำการบันทึกข้อมูลที่เกี่ยวข้องระยะเวลา 2 ชั่วโมงหรือจนกระทั่งไฟในเตาเผาถ่านดับลงจนแน่ใจว่าเสร็จสิ้นการทดสอบ ทั้งนี้แผนภาพการไหลของความร้อนจากเตาเผาถ่านไปยังตู้อบสามารถดูได้ใน Figure 2b

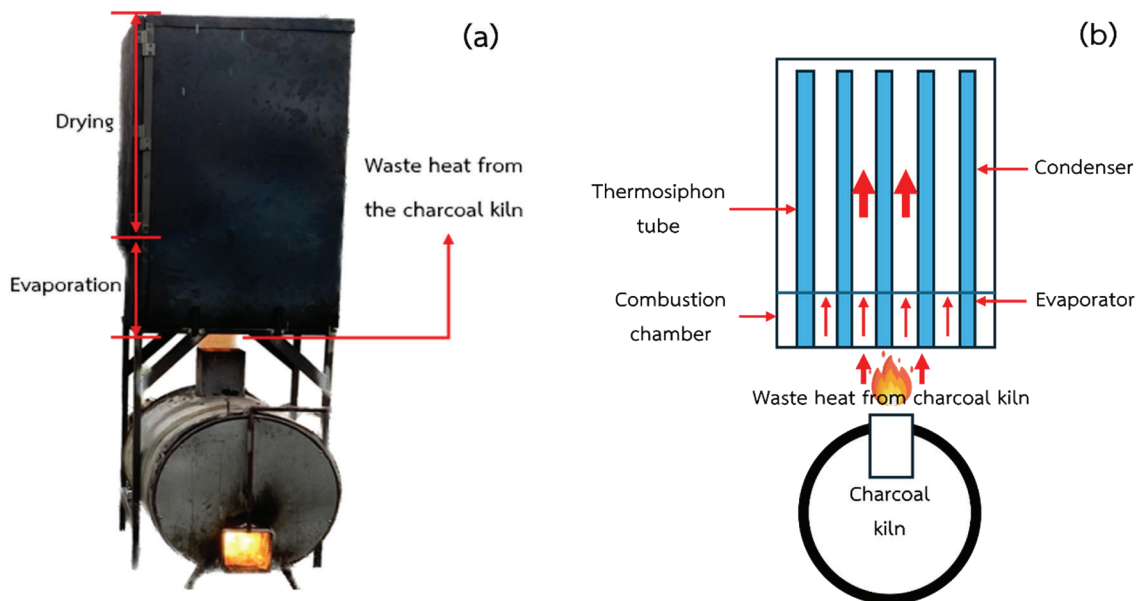


Figure 2 Thermosyphon-type drying chamber: (a) Actual image using waste heat from charcoal kiln, and (b) Heat flow diagram

4. การนำตัวอย่างมาทดสอบการอบ ใช้หมันชั้นเป็นตัวอย่างในการทดสอบ โดยนำตัวอย่างหมันชั้นใส่ในห้องอบและเก็บตัวอย่างในช่วงเวลาต่างๆ (DT) คือ 1.5 2 และ 2.5 ชั่วโมง (90 120 และ 150 นาที) ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เตาถ่านคายความร้อนและสามารถจุดติดไฟจนถึงจุดที่อุณหภูมิคงที่สูงสุดได้ เพื่อศึกษาและหาเวลาอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบหมันชั้นภายใต้สภาวะดังกล่าว และแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ ตู้เปล่า (ไม่มีท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน) ตู้ที่ติดตั้งท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนและเติมสารทำงาน R-134a

5. การวิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดสอบ หลังจากการทดลองอบตัวอย่างหมันชั้นแล้วจะทำการตรวจสอบค่าความชื้นก่อนและหลังการอบ โดยการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างก่อนและหลังการอบ เพื่อคำนวณค่าการสูญเสียความชื้น รวมถึงการหาค่า a_w (water activity) และค่าสีของหมันชั้นเพื่อประเมินผลการทดสอบและความเหมาะสมของตู้อบต่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนในการอบสมุนไพร

Results and Discussion

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของตู้อบแบบท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนในการกระจายความร้อน

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) (Table 1) แสดงให้เห็นว่าระบบการอบแห้ง ความหนา และระยะเวลาการอบแห้ง ส่งผลต่อการสูญเสียความชื้นและค่าแอคติวิตีของน้ำ (A_w) อย่างมีนัยสำคัญ ในบรรดาปัจจัยเหล่านี้ ระบบการอบแห้ง (A) และระยะเวลาการอบแห้ง (C) เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุด ($P < 0.01$) การปฏิสัมพันธ์ระหว่างระบบการอบแห้งกับเวลา ($A \times C$) มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อทั้งสอง

ตัวแปรแสดงว่าการเลือกเวลาต้องพิจารณาร่วมกับประเภทระบบการอบแห้งที่ใช้ นอกจากนี้ปฏิสัมพันธ์ส่วนใหญ่มีผลต่อค่า A_w มากกว่าการสูญเสียความชื้น ในทางตรงกันข้าม ค่า $A \times B$ ไม่แสดงผลอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งให้เห็นว่าประสิทธิภาพของระบบไม่ขึ้นอยู่กับความหนา ดังนั้นในการออกแบบกระบวนการอบแห้งควรให้ความสำคัญกับการเลือกระบบการอบแห้งเป็นลำดับแรก ตามด้วยการกำหนดเวลาที่เหมาะสมกับระบบที่เลือกใช้

ผลการศึกษาบ่งชี้ว่าการเพิ่มเวลาในการอบแห้ง (DT) จะช่วยเพิ่มการสูญเสียความชื้นในความหนาทุกขนาด (2 มม. 4 มม. และ 6 มม.) ดัง Figure 3 การนำระบบเทอร์โมโซฟอน (TS) มาใช้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้งได้อย่างมาก ดังจะเห็นได้จากเปอร์เซ็นต์การสูญเสียความชื้นที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีเทอร์โมโซฟอน (No TS) ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาครั้งก่อน ๆ ที่เน้นย้ำถึงประสิทธิภาพของระบบอบแห้งที่ใช้เทอร์โมโซฟอนในการเร่งการขจัดความชื้นและเพิ่มความสม่ำเสมอในการอบแห้ง [14]

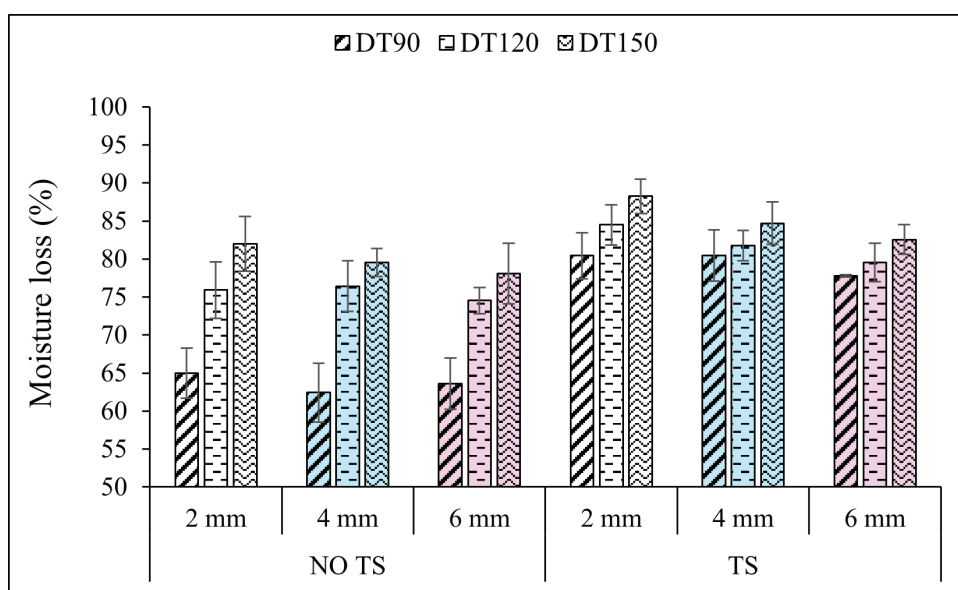


Figure 3 Effects of temperature and thickness on moisture loss under NO TS vs TS conditions

เมื่อพิจารณาปัจจัยด้านเวลาอบแห้งที่ความหนาขนาดเล็กที่สุด (2 มม.) การสูญเสียความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 64.97% (No TS) เป็น 80.43% (TS) ที่ 90 นาที และเพิ่มขึ้นอีกเป็น 81.98% (No TS) และ 88.25% (TS) ที่ 150 นาที (Figure 3) แนวโน้มที่คล้ายกันนี้พบในความหนาขนาด 4 มม. และ 6 มม. โดยที่วิธีการอบแห้งด้วยความช่วยเหลือของ TS ส่งผลให้สูญเสียความชื้นมากขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากเทคโนโลยีเทอร์โมโซฟอน ซึ่งช่วยให้ความชื้นระเหยออกจากความหนาแน่นได้อย่างรวดเร็ว [15]

ยิ่งไปกว่านั้น ขนาดความหนาของขม้นยังส่งผลต่อประสิทธิภาพการอบแห้งอย่างมากมี โดยขนาดความหนาที่เล็กลงจะสูญเสียความชื้นมากขึ้น ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้จากอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่เพิ่มขึ้นในความหนาขนาดเล็ก ทำให้ความร้อนแทรกซึมและกระจายความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพมาก [16] ผลการวิจัยเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าทั้งระยะเวลาการอบแห้งและวิธีการอบแห้งด้วยความช่วยเหลือของ

เทอร์โมไซฟอนมีส่วนช่วยในการปรับปรุงการกำจัดความชื้น ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการยืดอายุการเก็บรักษา และคุณภาพของขมิ้นแห้ง

การปรับสภาพการอบแห้งให้เหมาะสมในการแปรรูปขมิ้นเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพทางเศรษฐกิจ การใช้เทคโนโลยีเทอร์โมไซฟอนถือเป็นแนวทางแก้ปัญหาที่น่าสนใจสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งพร้อมทั้งลดการใช้พลังงาน การวิจัยในอนาคตควรศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในการอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศที่แตกต่างกันต่อการอบแห้งขมิ้นเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการแปรรูปให้ดียิ่งขึ้น

กระบวนการอบแห้งส่งผลอย่างมากต่อกิจกรรมของน้ำ (A_w) ของขมิ้น ดัง Figure 4 ซึ่งส่งผลโดยตรงต่ออายุการเก็บรักษา ความเสถียรของจุลินทรีย์ และการรักษาคุณภาพ ข้อมูลค่า A_w ได้รับอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญจากทุกปัจจัย ได้แก่ ระบบอบแห้ง ความหนาและเวลาอบแห้ง (Table 1) ผลลัพธ์บ่งชี้ว่าระยะเวลาการอบแห้งที่ยาวนานขึ้นทำให้ค่า A_w ลดลงในทุกขนาดความหนา ค่า A_w ที่สูงขึ้นสัมพันธ์กับการสูญเสียความชื้นที่เพิ่มขึ้น [17] นอกจากนี้ การมีระบบเทอร์โมไซฟอน (TS) จะลด A_w ลงอย่างสม่ำเสมอเมื่อเทียบกับการอบแห้งโดยไม่ใช้เทอร์โมไซฟอน (No TS) ซึ่งบ่งชี้ว่าประสิทธิภาพการอบแห้งดีขึ้น

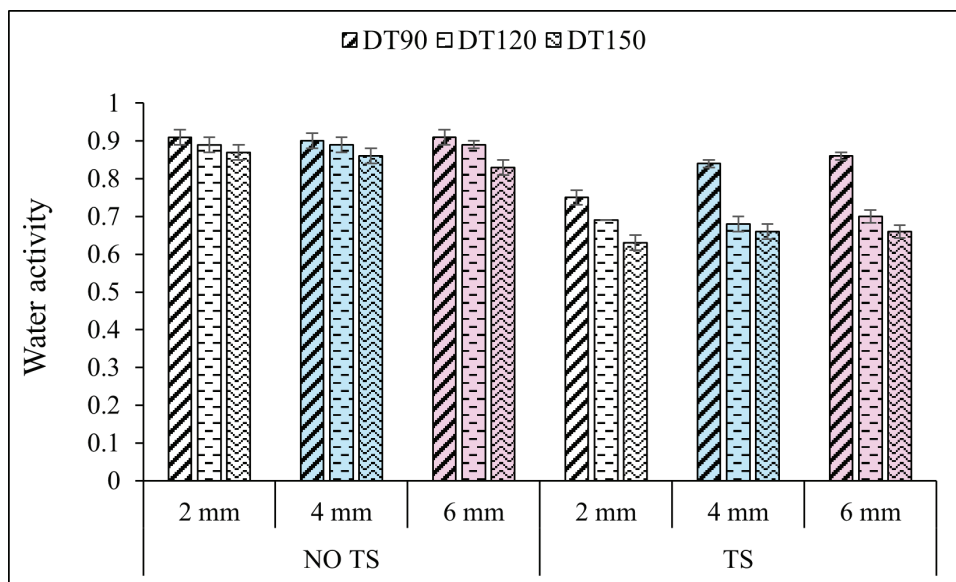


Figure 4 Effects of temperature and thickness on water activity under NO TS vs TS conditions

สำหรับขนาดความหนาที่เล็กที่สุด (2 มม.) A_w ลดลงจาก 0.91 (No TS) เป็น 0.75 (TS) ที่ 90 นาที ลดลงอีกเป็น 0.87 (No TS) และ 0.63 (TS) ที่ 150 นาที สังเกตพบแนวโน้มที่คล้ายกันสำหรับขนาดความหนา 4 มม. และ 6 มม. ซึ่งการอบแห้งด้วยท่อเทอร์โมไซฟอนส่งผลให้ค่า A_w ลดลงอย่างสม่ำเสมอ การลดลงของ A_w นี้มีความสำคัญ เนื่องจากค่าที่ต่ำกว่า (< 0.6) จะช่วยยับยั้งการเติบโตของจุลินทรีย์ ปฏิกิริยาของเอนไซม์ และการเสื่อมสภาพจากออกซิเดชัน ซึ่งในที่สุดจะขยายความเสถียรในการจัดเก็บของขมิ้นแห้ง [18]

อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองพบว่า ค่า A_w ของขมิ้นแห้งในทุกเงื่อนไขยังคงสูงกว่า 0.6 แม้ว่าจะยังไม่สามารถบรรลุเกณฑ์ความปลอดภัยได้อย่างสมบูรณ์ แต่ผลลัพธ์แสดงให้เห็นแนวโน้มของการลดค่า A_w ให้อยู่ใกล้เคียงกับเกณฑ์ดังกล่าว (0.63–0.66) ซึ่งนับเป็นแนวทางสำคัญในการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบอบแห้งในอนาคต เช่น การออกแบบทิศทางทางไหลของอากาศ ระยะเวลาอบที่เหมาะสม หรือการพัฒนาเตาอบให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

ผลลัพธ์ยังเน้นย้ำถึงอิทธิพลของขนาดความหนาที่มีต่อ A_w โดยที่ความหนาขนาดเล็กกว่าจะแสดงค่า A_w ที่ต่ำกว่าเนื่องจากอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่สูงกว่า ซึ่งช่วยให้กำจัดความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น การสังเกตนี้สอดคล้องกับการศึกษาที่ระบุว่าความหนาอาหารขนาดเล็กจะแห้งเร็วกว่าและมีค่า A_w ต่ำกว่าภายใต้สภาวะการอบแห้งที่ควบคุมเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลที่เพิ่มขึ้น เช่น ชิ้นกล้วยที่มีความหนา 2 มม. แสดงให้เห็นถึงอัตราการอบแห้งที่เหมาะสม [19]

Table 1 ANOVA results

Source of variation	df	F-value (p-value)	
		Moisture loss	Water activity
Drying system (A)	2	127.76 ^{**}	1102.77 ^{**}
Thickness (B)	1	5.65 ^{**}	5.19 [*]
Drying time (C)	2	62.33 ^{**}	169.51 ^{**}
AxB	2	0.67 ^{ns}	14.25 ^{**}
AxC	2	17.29 ^{**}	56.54 ^{**}
BxC	4	0.39 ^{ns}	5.49 ^{**}
AxBxC	4	0.39 ^{ns}	4.28 ^{**}
Error	34		
Total	53		

Note: ns means non-significant, * $P \leq 0.05$, and ** $P \leq 0.01$, and df refers to degrees of freedom

ผลการวิจัยเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าการปรับเวลาการอบแห้งที่เหมาะสมและการอบแห้งด้วยท่อของเทอร์โมไซฟอนสามารถปรับปรุงคุณภาพและอายุการใช้งานของขมิ้นแห้งได้อย่างมาก การนำแนวทางนี้ไปใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปขมิ้นสามารถนำไปสู่ความเสถียรของผลิตภัณฑ์ที่ดีขึ้น ความเสี่ยงจากจุลินทรีย์ที่ลดลง และผลลัพธ์ทางเศรษฐกิจที่ดีขึ้น การวิจัยในอนาคตควรสำรวจผลกระทบของอุณหภูมิในการอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศที่แตกต่างกันเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบการอบแห้งด้วยเทอร์โมไซฟอนสำหรับการแปรรูปเครื่องเทศให้ดียิ่งขึ้น



Figure 5 Turmeric slice appearances: (a) Fresh (2 mm), (b) TS-dried 150 min, (c) NO TS-dried 150 min, and (d) Commercially dried

คุณภาพของสีเป็นหนึ่งในคุณลักษณะที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อมูลค่าทางการค้าและการรับรู้ของผู้บริโภคเกี่ยวกับไขมันแห้ง ดังที่แสดงใน Figure 5 และ Table 2 กระบวนการอบแห้งส่งผลต่อคุณภาพสีได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น Komonsin และคณะ [20] รายงานว่า curcumin สามารถถูกทำลายได้จากการสัมผัสกับอุณหภูมิสูงและแสงอัลตราไวโอเลต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีระยะเวลาอบแห้งยาวนาน กลไกที่คล้ายคลึงกันนี้ยังพบในกระบวนการอบแห้งหอยนางรม ซึ่งเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาลจากกระบวนการออกซิเดชันของสารฟีนอล ส่งผลให้สีของผลิตภัณฑ์เข้มข้นเมื่ออบด้วยลมร้อน [21] หากพิจารณาผลของระบบ Thermosiphon (TS) เทียบกับการอบแห้งแบบปกติ (No TS) สำหรับไขมันชั้นความหนา 2 มม. ที่เวลาอบ 150 นาที (ซึ่งตรงกับ b และ c ใน Figure 5) พบว่าแม้ค่าความสว่าง (L) ของตัวอย่าง TS (+33.6) และ No TS (+33.6) จะเท่ากัน แต่ค่า a และ b ของตัวอย่าง TS มีค่าต่ำกว่าอย่างมาก (ค่า a จาก +15.4 ใน No TS ลดลงเหลือ +7.4 ใน TS และค่า b จาก +25.8 ใน No TS ลดลงเหลือ +13.7 ใน TS) การลดลงอย่างมากของค่า a* และ b* ในตัวอย่างระบบเทอร์โมไซฟอน (TS) สอดคล้องกับผลใน Figure 5b ซึ่งแสดงให้เห็นไขมันชั้นที่มีสี เหลืองสด เมื่อเปรียบเทียบกับ Figure 5c ที่แสดงไขมันชั้นที่มีสี เปลี่ยนจากเหลืองไปทางน้ำตาล/ส้มเข้ม พร้อมกับค่า b* ที่สูงขึ้นไปทาง เหลืองเข้มมาก ซึ่งเกิดจากความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอ ในการอบแบบ ไม่มีเทอร์โมไซฟอน สาเหตุเหล่านี้น่าจะมาจากประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นของระบบ TS ซึ่งอาจเร่งการย่อยสลายของเคอร์คูมินอยด์ ซึ่งเป็นเม็ดสีหลักที่ทำให้ไขมันมีสีเหลือง [22]

Table 2 Effects of drying time and thermosiphon pipe usage on color parameters of turmeric of different thicknesses

Drying time (min)	Thickness (mm)	Color parameter					
		L		a		b	
		No TS	TS	No TS	TS	No TS	TS
90	2	+42.3	+41.5	+23.8	+10.1	+30.7	+16.8
	4	+43.5	+42.0	+24.2	+10.4	+31.2	+25.7
	6	+43.9	+41.3	+25.3	+15.9	+33.4	+25.8
120	2	+37.4	+38.9	+20.7	+9.8	+30.1	+18.0
	4	+39.8	+39.4	+17.9	+8.4	+29.5	+19.3
	6	+40.1	+32.7	+19.8	+9.5	+28.4	+14.6
150	2	+33.6	+33.6	+15.4	+7.4	+25.8	+13.7
	4	+34.0	+33.9	+14.3	+6.9	+26.2	+12.8
	6	+32.2	+35.0	+13.1	+6.2	+24.3	+13.7

เมื่อเปรียบเทียบกับขมิ้นแห้งเชิงพาณิชย์ (Figure 5d) พบว่าขมิ้นแห้งจากการทดลองระบบ TS มีสีเหลืองสดใสมากกว่าและมีความสม่ำเสมอของสีที่ดีกว่า ขมิ้นแห้งเชิงพาณิชย์มีลักษณะสีที่คล้ำและไม่สม่ำเสมอ คล้ายระบบ NO TS ซึ่งอาจเป็นผลมาจากกระบวนการอบแห้งที่ไม่ได้ควบคุมอย่างเหมาะสม ทั้งในด้านอุณหภูมิ และระยะเวลา ทำให้เกิดการสูญเสียเม็ดสีและความแปรปรวนของสีในผลิตภัณฑ์ แม้ว่าจะไม่มีเกณฑ์มาตรฐานที่ชัดเจนสำหรับค่าพารามิเตอร์สีของขมิ้นแห้ง แต่ผลการเปรียบเทียบนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของระบบอบแห้งของการศึกษานี้ในการรักษาคุณภาพสีของขมิ้นแห้งในทางการค้า

Table 3 ผลการเปรียบเทียบความเป็นไปได้เชิงสมมติฐานของระบบอบแห้งขมิ้นระหว่างแบบไม่มีท่อเทอร์โมไซฟอน (No TS) และแบบมีท่อเทอร์โมไซฟอน (TS) ที่ความหนา 2 มม. และใช้เกณฑ์เงื่อนไขการสูญเสียความชื้นมากกว่า 80% พบว่าระบบ TS มีประสิทธิภาพสูงกว่า แม้ใช้ความหนาขมิ้นเท่ากัน (2 มม.) แต่ TS ใช้เวลาอบเพียง 90 นาที ขณะที่ No TS ใช้ถึง 150 นาที จึงทำให้ TS มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถอบได้ประมาณ 2 รอบต่อวัน เทียบกับ 1 รอบของ No TS ส่งผลให้ปริมาณขมิ้นสดที่อบได้เพิ่มจากปกติ 10 เป็น 20 กิโลกรัม และให้ผลผลิตขมิ้นแห้งเพิ่มจาก 1.8 เป็น 3.6 กิโลกรัมต่อวัน เมื่อคิดราคาขายที่เท่ากัน (150 บาท/กก.) ระบบ TS สร้างรายได้รวมได้ 540 บาท/วัน ขณะที่ No TS ได้เพียง 270 บาท แม้ระบบ TS จะมีต้นทุนเริ่มต้นสูงกว่า (9,000 บาท เทียบกับ 6,000 บาท) แต่ผลลัพธ์ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพในการเพิ่มผลผลิตและรายได้ ทั้งนี้ ข้อมูลดังกล่าวเป็นเพียงการสมมติเปรียบเทียบเบื้องต้น ยังไม่รวมการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์เชิงลึก เช่น ต้นทุนผันแปรหรือระยะเวลาการคืนทุน

Table 3 Hypothetical feasibility comparison of drying systems assuming aw meets the < 0.6 standard

Parameter	Drying system	
	No TS	TS
Purchase price of equipment (THB)	6,000	9,000
Turmeric slice thickness (mm)	2	2
Drying time (min) for $>80\%$ moisture loss	150	90
Fresh turmeric per cycle (kg)	10	10
Turmeric production capacity (cycle/day)	1	2
Dried turmeric per day (kg) [23]	1.8	3.6
Revenue per kg dried turmeric (THB)	150	150
Total revenue per day (THB)	270	540

Note: The dried turmeric weight per day is calculated based on the initial fresh moisture content to the final dried state.

Conclusion

การศึกษานี้มุ่งเน้นการออกแบบและประเมินประสิทธิภาพของตู้อบแบบท่อเทอร์โมไซฟอนโดยใช้พลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเตาเผาถ่าน เพื่อประยุกต์ใช้ในการอบแห้งขมิ้นชัน ผลการทดลองสามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

1. ตู้อบแบบท่อเทอร์โมไซฟอนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ทำให้สามารถลดความชื้นของขมิ้นได้ดีกว่าระบบอบทั่วไป และลดเวลาในการอบ

2. การเพิ่มระยะเวลาอบมีผลให้ค่าความชื้นลดลงอย่างต่อเนื่อง ส่วนค่าความหนาของชั้นขมิ้นมีผลต่ออัตราการสูญเสีย น้ำ โดยชั้นบางแห้งได้เร็วกว่า

3. ค่า aw ของขมิ้นแห้งที่ได้จากระบบยังคงสูงกว่าเกณฑ์ความปลอดภัย (< 0.6) แสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของระบบอบในด้านการควบคุมอุณหภูมิและความสม่ำเสมอของความร้อน แต่ระบบอาจเหมาะสมกับสมุนไพรชนิดอื่น

4. พลังงานความร้อนที่ใช้มาจากแหล่งความร้อนเหลือทิ้งซึ่งมีความแปรผันสูง จึงควรมีการปรับปรุงเงื่อนไขการอบเพิ่มเติม เช่น การควบคุมอุณหภูมิและการออกแบบทิศทางลม

5. ระบบนี้มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในระดับครัวเรือนหรือชุมชน และควรมีการศึกษาต่อยอดเพื่อให้เหมาะสมกับการผลิตในระดับอุตสาหกรรม

Acknowledgements

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนสนับสนุนโครงการพัฒนางานสร้างสรรค์สู่งานวิจัยเพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีนักศึกษาระดับปริญญาตรี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

References

1. Pereira, A.K.S., Cupertino, G.F.M., da Silva, Á.M., Oliveira, T.R., de Souza, M.P., Delatorre, F.M. and Dias Júnior, A.F. 2023. Perspectives and challenges of world charcoal production in technological, social, and climate change fields. *Forest Science: Sustainable Processes and Wood Products*, 1, 1–23.
2. Tang, M., Li, G., Zhang, M., Zhou, X., Cai, K., Hu, S., Wu, L. and Cao, W. 2025. Comprehensive analysis and optimization of waste heat recovery and utilization in paper drying process. *Energy*, 325, 136084.
3. Agathokleous, R., Bianchi, G., Panayiotou, G., Aresti, L., Argyrou, M.C., Georgiou, G.S. Tassou, S.A., Jouhara, H., Kalogirou, S.A., Florides, G.A. and Christodoulides, P. 2019. Waste heat recovery in the EU industry and proposed new technologies. *Energy Procedia*, 161, 489-496.
4. Kalogirou, S.A. 2009. Solar water heating systems (pp. 251-314), in *Solar Energy Engineering*, Elsevier.
5. Nemec, P. and Malcho, M. 2015. Visualization of working fluid flow in gravity assisted heat pipe. *EPJ Web of Conferences*, 92, 02053.
6. Kravets, V., Shepel, H., Hurov, D. and Danylovich, A. 2024. Influence of geometric factors on the heat transfer characteristics of two-phase thermosyphons. *Technology and Design in Electronic Equipment*, 1–2, 43–48.
7. Sutanto, B., Indartono, Y.S., Wijayanta, A.T. and Iacovides, H. 2022. Enhancing the performance of floating photovoltaic system by using thermosiphon cooling method: Numerical and experimental analyses. *International Journal of Thermal Sciences*, 180, 107727.
8. Tamuli, B.R. and Choudhury, P.K. 2020. Comparative performance assessment of a solar hybrid dryer with traditional drying techniques (pp. 351-360), in *Advances in Energy Research*, Vol. 2, Springer, Singapore.

9. Yao, Y., Pang, Y.X., Manickam, S., Lester, E., Wu, T. and Pang, C.H. 2022. A review study on recent advances in solar drying: Mechanisms, challenges and perspectives. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 248, 111979.
10. Menon, A., Stojceska, V. and Tassou, S.A. 2020. A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies. *Trends in Food Science & Technology*, 100, 67–76.
11. He, Y., Hu, C., Li, H., Hu, X. and Tang, D. 2022. Experimental investigation on aircooling type loop thermosyphon thermal characteristic with serpentine tube heat exchanger. *International Journal of Refrigeration*, 138, 52–60.
12. Krishnan, S. and Sivaraman, B. 2017. Effect of slice thickness on quality of dried products in a solar cabinet dryer. *American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture*, 11, 7–13.
13. Cherdpant, W. and Ayus, W. 2001. Environmental impact of refrigerants in automobiles. *Proceedings of the Air Conditioning Engineering Association*, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 1–10. (In Thai)
14. Bezbah, I., Zykov, A., Mordynskiy, V., Osadchuk, P., Phylipova, L., Bandura, V., Yarovyi, I. and Marenchenko, E. 2022. Designing the structure and determining the mode characteristics of the grain dryer based on thermosiphons. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2, 54–61.
15. Takeshi, Y., Omi, Y. and Miura, K. 2019. “Thermosiphon-Type Temperature Control Device,” WO Patent No. 2019087574A1, World Intellectual Property Organization [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/WO2019087574A1>. [15 July 2025].
16. Nukulwar, M.R. and Tungikar, V.B. 2020. Thin-layer mathematical modeling of turmeric in indirect natural conventional solar dryer. *Journal of Solar Energy Engineering*, 142, 041001.
17. Erlikhman, V.N. and Fatykhov, Yu.A. 2018. The account of water activity in the calculation of the rate of food product shrinkage. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 80, 18-21.
18. Majid, D., Sofi, S.A., Jabeen, A., Allai, F.M., Makroo, H.A. and Wani, S.P. 2022. Dried foods: Science, shelf life, and quality (pp. 141-154), in *Shelf Life and Food Safety*, CRC Press, Boca Raton.

19. Amer, B.M., Azam, M.M. and Saad, A. 2023. Monitoring temperature profile and drying kinetics of thin-layer banana slices under controlled forced convection conditions. *Processes*, 11, 1771.
20. Komonsing, N., Reyer, S., Khuwijitjaru, P., Mahayothee, B. and Müller, J. 2022. Drying behavior and curcuminoids changes in turmeric slices during drying under simulated solar radiation as influenced by different transparent cover materials. *Foods*, 11, 696.
21. Hu, Y., Zeng, X., Jiang, K., Luo, Y., Quan, Z., Li, J. and Zhu, B. 2024. Effect of nonenzymatic browning on oysters during hot air drying process: Color and chemical changes and insights into mechanisms. *Food Chemistry*, 454, 139758.
22. Roy, J., Leake, M.E., Barsha, A.S., Sherpa, T.L., Adebawale, A., Heda, G. and Yarborough, L. 2015. Thin layer chromatographic analysis of stability of curcumin and curcumin in turmeric after refluxing in water and using double mobile phase after heating in edible oils. *Journal of the Mississippi Academy of Sciences*, 60, 319–326.
23. Department of Agriculture, 2023, Academic documents: Turmeric *Curcuma Longa* L., Department of Agriculture, Horticulture Research Institute, Thailand [Online] Available: <https://www.doa.go.th/hort/wp-content/uploads/2023/02/เอกสารวิชาการ-ขมิ้นชัน-กลุ่มวิชาการ-สวส.pdf>. [30 July 2025].