

การพัฒนาระบบอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดต้นทุนต่ำ

Development of a Low-Cost Pulsed Vacuum Infrared (PVI) Drying System

วัชรพล ชยประเสริฐ¹ ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์¹ และ ชุกเกียรติ โชติกเสถียร^{2*}

Watcharapol Chayaprasert¹, Siwalak Pathaveerat¹ and Chukiat Chotikasatian^{2*}

Received: 6 September 2023, Revised: 12 November 2023, Accepted: 20 December 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยต้องการที่จะพัฒนาระบบอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์ร่วมกับอินฟราเรด โดยใช้วัสดุและอุปกรณ์ต้นทุนต่ำ เพื่อเป็นต้นแบบให้ผู้สนใจนำไปพัฒนาสร้างใช้งานได้ด้วยตนเอง การทำงานของสุญญากาศแบบพัลส์ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด (Pulsed vacuum infrared - PVI) ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ถูกใช้ในการควบคุม โซลินอยด์วาล์วอากาศ, โซลินอยด์วาล์วสุญญากาศ, หลอดไฟอินฟราเรด และปั๊มสุญญากาศ ทดสอบอบแห้งตะไคร้แห้งที่อัตราส่วนพัลส์ (ระยะเวลาช่วงรักษาสุญญากาศ (t_{VP}) : ระยะเวลาช่วงคงความดันบรรยากาศ (t_{AP})) เท่ากับ 8:4, 13:4 และ 18:4 ตามลำดับ ปริมาณความชื้น, น้ำหนักของตะไคร้แห้ง และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ของระบบถูกบันทึกในระหว่างการทดลอง ในการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนพัลส์ $t_{VP}:t_{AP}$ เท่ากับ 8:4 เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดกับการอบแห้ง โดยตะไคร้แห้งมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 55%_{d.b.} ระบบใช้ระยะเวลาอบแห้งเพียง 180 min และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 11%_{d.b.} ค่าเฉลี่ยความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่า 0.019 MJ/g_{water} และมีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 0.6 kW·h/batch งบประมาณในการสร้างเครื่องต้นแบบคิดเป็น 10,450 baht และมีระยะเวลาในการคืนทุนเท่ากับ 6.48 year ผลการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า ระบบอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดต้นทุนต่ำสามารถอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มจำนวนชั้นและปริมาตรภายในโครงสร้างระบบสุญญากาศจะทำให้ปริมาณผลผลิตจากการอบแห้งมีปริมาณมากขึ้น

คำสำคัญ: การอบแห้ง, สุญญากาศแบบพัลส์, อินฟราเรด, ตะไคร้

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

¹ Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

² สาขาวิชาอุตสาหกรรมศิลป์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม 73000

² Industrial Arts, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Muang, Nakhon Pathom 73000, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): chukiat@npru.ac.th

ABSTRACT

In this study, a low-cost pulsed vacuum infrared (PVI) drying system was developed using locally available parts, allowing interested individuals to build and use it themselves. The ESP32 microcontroller, in conjunction with solenoid valves, infrared lamps and vacuum pumps, monitored and controlled the PVI drying process. The product used for testing the system was sliced lemongrass. The ratios between the time periods of vacuum and atmospheric pressures ($t_{vp}:t_{AP}$ pulse ratios) used in the tests were 8:4, 13:4 and 18:4. The specific energy consumption (SEC) of the system, as well as the weight and moisture content of the dried product, were recorded. It was found that the $t_{vp}:t_{AP}$ pulse ratio of 8:4 was optimal for drying with the developed system. The dried lemongrass had a final moisture content of less than 11%_{db}, despite having the highest initial moisture content (roughly 55%_{db}) and the quickest drying time (roughly 180 min). The electrical energy consumption was roughly 0.6 kW·h, and the mean SEC was 0.019 MJ/g_{water}. The total cost of the parts and materials was 10,450 baht and the payback period was 6.48 years. With the developed system, drying of agricultural products can be done efficiently using PVI. Nevertheless, the drying yield can be increased by increasing the number of trays and volume of the vacuum chamber.

Key words: drying, pulsed vacuum, infrared, lemongrass

บทนำ

การอบแห้งเป็นกระบวนการสำคัญในอุตสาหกรรมหลายประเภทรวมถึงการแปรรูปและถนอมอาหาร ปัจจุบัน สมุนไพร (Herb) เป็นพืชที่นิยมนำมาใช้ทำเป็นชาสมุนไพรสำหรับการบริโภค โดยองค์ประกอบภายในสมุนไพรจะมีปริมาณน้ำมันหอมระเหย (Essential oil) เช่น ตะไคร้, ใบบัวบก, สะระแหน่, จิง เป็นต้น (Syafitri *et al.*, 2018; Thamkaew *et al.*, 2021) หลายงานวิจัยได้แสดงการเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากตะไคร้ซึ่งได้จากวิธีการอบแห้งที่แตกต่างกัน เช่น ตากแห้งด้วยแสงแดด, การตากแห้งในที่ร่ม, การอบแห้งด้วยลมร้อน, การแผ่รังสีอินฟราเรด เป็นต้น การอบแห้งด้วยลมร้อนและการแผ่รังสีอินฟราเรดจะทำให้ได้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยสูงกว่าการตากแห้งด้วยแสงแดดและการตากแห้งในที่ร่ม (Mohamed Hanaa

et al., 2012; Dutta *et al.*, 2014; Setareh *et al.*, 2023) นอกจากนี้ การใช้อุณหภูมิสูงในการอบแห้งมักจะทำให้เกิดการสลายของน้ำมันหอมระเหย และมีความเสี่ยงต่อการเกิดรอยแตกหักของสมุนไพรซึ่งนำไปสู่การระเหยของน้ำมันหอมระเหยได้เช่นกัน (Argyropoulos and Müller, 2014) Tirawanichakul *et al.* (2013) สรุปผลการทดลองได้ว่าตะไคร้ที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิไม่เกิน 60°C จะมีกลิ่นหอมมากกว่าการตากแห้งด้วยแสงแดด อย่างไรก็ตาม มีงานวิจัยที่ให้ผลในทางตรงกันข้าม ว่าการทำแห้งใบ Lemon myrtle ด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิการอบแห้ง 50°C ส่งผลให้ปริมาณซิทรัล (Citral) ซึ่งเป็นสารที่พบได้ในส่วนประกอบของน้ำมันหอมระเหย มีปริมาณสูงกว่าที่อุณหภูมิของการอบแห้ง 30°C และ 40°C (Buchailot *et al.*, 2009) นอกจากนี้ การลดระยะเวลาในการทำแห้งยังส่งผลดี

ต่อองค์ประกอบทางเคมีและคุณภาพของพืช (Figiel and Michalska, 2016) โดย Tirawanichakul *et al.* (2013) พบว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดใช้เวลาน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน 30% อย่างไรก็ตาม วิธีการเหล่านี้มีข้อจำกัดเนื่องจากใช้เวลานานในการอบแห้ง การกระจายความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอ และการใช้พลังงานสูง เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด (Pulsed vacuum infrared - PVI) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขข้อจำกัดเหล่านี้ ในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ฮีตเตอร์อินฟราเรดจะแผ่รังสีอินฟราเรดไปยังผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้ง ซึ่งผลิตภัณฑ์จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อดูดซับรังสีอินฟราเรด และทำให้ความชื้นภายในระเหยออกไป เนื่องจากรังสีอินฟราเรดทำให้วัสดุร้อนขึ้นโดยตรง จึงใช้พลังงานน้อยกว่าและยังเป็นที่ทราบกันดีว่าวิธีการอบแห้งที่อาศัยการพาความร้อนหรือการนำความร้อน การอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์เป็นการทำให้ ผลิตภัณฑ์อบแห้งอยู่ในสภาวะสุญญากาศสลับกับสภาวะความดันบรรยากาศสลับกันอย่างต่อเนื่องเป็นวัฏจักร ในช่วงสภาวะสุญญากาศ ความชื้นภายในห้องอบแห้งจะลดลง ซึ่งทำให้ความชื้นภายในผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นก๊าซและถ่ายเทออกจากผลิตภัณฑ์ไปเป็นไอน้ำอยู่ในบรรยากาศภายในห้องอบแห้ง จากนั้นไอน้ำจะถูกกำจัดออกจากห้องอบแห้งด้วยปั๊มสุญญากาศ การเปลี่ยนแปลงความดันในห้องอบแห้งระหว่างสุญญากาศกับความดันบรรยากาศทำให้ช่องว่างหรือรูพรุนขนาดเล็กในผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีลักษณะเป็นวัสดุพรุน (Porous media) ขยายตัวส่งผลให้น้ำภายในสามารถแพร่ออกไปยังผิวของผลิตภัณฑ์ได้รวดเร็วขึ้น นำไปสู่อัตราการอบแห้งที่สูงขึ้น (Manangan and Witinantakit, 2020) การอบแห้งแบบ PVI สามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำจึงเหมาะสมสำหรับ

ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการลดการสูญเสียปริมาณองค์ประกอบทางเคมีบางชนิด

การอบแห้งแบบ PVI เป็นเทคนิคการอบแห้งที่รวมข้อได้เปรียบของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดและการอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์เข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดในช่วงเวลาสั้น ๆ ในสภาวะสุญญากาศเพื่อขจัดความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ Wang *et al.* (2018); Jiang *et al.* (2022); Xie *et al.* (2017a) ใช้เครื่องอบแห้งและวิธีการทดลองคล้ายกัน ทำการศึกษาการอบแห้งเลมอน (*Citrus limon* (L.) Burm. f) หั่นแว่น, สับปะรด (*Ananas comosus* L.) หั่นแว่น และโกจิเบอร์รี่ (*Lycium barbarum* L.) ตามลำดับ ทั้งสามการศึกษาได้ข้อสรุปเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือ เทคโนโลยีอบแห้งแบบ PVI สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งได้ ในขณะที่ยังคงรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้อย่างเหมาะสม Manangan and Witinantakit (2020) ทดสอบอบแห้งดอกบัวด้วยวิธีการแบบ PVI โดยออกแบบเครื่องอบแห้งที่ประกอบด้วยห้องอบแห้งทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 cm สูง 60 cm ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม, ปั๊มสุญญากาศขนาด 350 W, เซ็นเซอร์วัดความดัน, โซลินอยด์วาล์ว, หลอดไฟอินฟราเรดจำนวน 4 หลอด ให้กำลัง 250 W ต่อหลอด, เทอร์โมคัปเปิล, อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ PID (proportional-integral-derivative temperature controller), แผงสวิทช์ควบคุม และอุปกรณ์ควบคุม PLC (programmable logic controller) ผลการทดลองอัตราส่วนพัลส์ (i.e., ระยะเวลาช่วงรักษาสุญญากาศ (t_{vp}) : ระยะเวลาช่วงคงความดันบรรยากาศ (t_{ap})) ที่ 15:4 ใช้เวลาในการอบแห้ง 8 h ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดและมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดที่ 0.74 MJ/g_{water} Zhang *et al.* (2020) ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบ PVI ซึ่งมีห้องอบแห้งทรงเหลี่ยมทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดกว้าง 80 cm

ยาว 100 cm และสูง 150 cm จากนั้น จึงทำการทดสอบประสิทธิภาพการอบแห้งผลองุ่นและโกจิเบอร์รี่ เครื่องอบแห้งยังประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ให้ความร้อน, บั๊มสุญญากาศ, ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ ความดันและความชื้นสัมพัทธ์, ชุดอุปกรณ์บันทึกข้อมูล และชุดอุปกรณ์ควบคุมระบบ ผู้ใช้งานสามารถควบคุมเครื่องด้วยการสั่งงานผ่านจอสัมผัส (touch screen) งานวิจัยดังกล่าวพบว่า ระยะเวลาใน ช่วงสภาวะความดันบรรยากาศและความดันสุญญากาศ และอุณหภูมิอบแห้ง ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาอบแห้งและคุณภาพของโกจิเบอร์รี่อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการอบแห้งผลองุ่นและโกจิเบอร์รี่ที่อุณหภูมิ 65°C และที่อัตราส่วนพัลส์เป็น 15:4 และ 15:2 ตามลำดับ เป็นสภาวะที่ทำให้ผลการอบแห้งดีที่สุด โดยมีลักษณะของสีผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน

งานวิจัยต่าง ๆ ที่กล่าวถึงข้างต้นชี้ให้เห็นว่า การอบแห้งแบบ PVI สามารถใช้กับผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายชนิด และเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพ ซึ่งได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีอบแห้งดังกล่าวจำเป็นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิและสุญญากาศอย่างเป็นวัฏจักร ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุปกรณ์สำคัญที่จำเป็นสำหรับการทำงานของระบบอบแห้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งชุดอุปกรณ์ควบคุมระบบ เช่น PLC เป็นอุปกรณ์ที่มีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์ร่วมกับอินฟราเรด โดยใช้วัสดุและอุปกรณ์ต้นทุนต่ำ เพื่อเป็นต้นแบบให้ผู้สนใจสามารถพัฒนาสร้างใช้งานได้ด้วยตนเอง

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการพัฒนาระบบอบแห้งในการศึกษานี้ ผู้วิจัยมุ่งหวังให้ระบบมีต้นทุนต่ำและสามารถนำองค์ความรู้ไปพัฒนาต่อได้ โดยได้กำหนดเงื่อนไขการออกแบบโดยรวม (Overall design criteria) ไว้คือ

1) ระบบต้องสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งให้อยู่ระหว่าง 55 - 65°C ซึ่งเป็นช่วงเหมาะสมสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตรแปรรูปที่ไม่ทนความร้อน, 2) ระบบต้องสามารถอบแห้งตะไคร้ (*Cymbopogon citratus*) หั่นเป็นแว่นปริมาณไม่เกิน 200 g ซึ่งมีความชื้นไม่เกิน 50%_{db} ให้ลดได้ต่ำกว่า 15%_{db} ภายในเวลาไม่เกิน 3 h และ 3) งบประมาณรวมทั้งระบบไม่เกิน 15,000 baht เนื่องด้วยในบทความวิจัยต่าง ๆ (Wang *et al.*, 2018; Manangan and Witinantakit, 2020; Pei *et al.*, 2021) จะใช้คำว่า Pulsed vacuum drying เมื่อกล่าวถึง การอบแห้งในสภาวะสุญญากาศบางส่วน (Partial vacuum) ดังนั้นคำว่า “สุญญากาศ” ตลอดทั้งบทความวิจัยนี้หมายถึง Partial vacuum เท่านั้น

1. โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบอบแห้ง

Figure 1 แผนภาพโครงสร้างและองค์ประกอบของระบบอบแห้งแบบ PVI หลอดไฟอินฟราเรดขนาด 250 W จำนวน 2 หลอดถูกติดตั้งในตำแหน่งตรงข้ามกันในกล่องไม้อัดเคลือบสีดำทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากกว้าง 52 cm ยาว 84 cm และสูง 52 cm หลอดไฟอยู่สูงจากพื้นกล่อง 40 cm โถแก้ว (Desiccator) ปริมาณ 9,500 cm³ ทำหน้าที่เป็นห้องอบแห้งสุญญากาศ (Vacuum drying chamber) ถูกจัดวางที่กึ่งกลางภายในกล่อง ภายในโถแก้วมีถาดตะแกรงสำหรับวางผลิตภัณฑ์อบแห้ง ท่อลม PU (Polyurethane) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6.5 mm ถูกสอดผ่านจุกยาง (Rubber stopper) ที่ฝาโถแก้ว เซ็นเซอร์ (DS18B20) ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง ซึ่งสายสัญญาณของเซ็นเซอร์ถูกสอดผ่านจุกยางไปเชื่อมต่อเข้ากับกล่องควบคุม (Control box) ซึ่งถูกติดตั้งที่ผนังด้านนอกกล่องไม้ ผู้ใช้งานสามารถทราบความดันในห้องอบแห้งได้จากเกจวัดความดันสุญญากาศ (Vacuum pressure gauge) ซึ่งติดตั้งอยู่บนบั๊มสุญญากาศขนาด 1/3 HP

(VE225N, Value Mechanical & Electrical Product Co. Ltd., Zhejiang, China) เมื่อโซลินอยด์วาล์วอากาศเปิดออก ในขณะที่โซลินอยด์วาล์วสุญญากาศปิดอยู่ ห้องอบแห้งมีสถานะความดันบรรยากาศ ในทางตรงกันข้าม เมื่อปั๊มสุญญากาศทำงานและวาล์วสุญญากาศเปิดออกในขณะที่วาล์วอากาศปิดอยู่

ห้องอบแห้งมีสถานะสุญญากาศ ห้องควบแน่น (Condenser) เป็นขดแก้วในอ่างน้ำแข็ง อากาศที่ถูกปั๊มดูดจากห้องอบแห้งจะผ่านห้องควบแน่นก่อนเข้าสู่ปั๊มและออกสู่บรรยากาศ ไอน้ำในอากาศจากห้องอบแห้งจะควบแน่นเป็นของเหลวในห้องควบแน่น

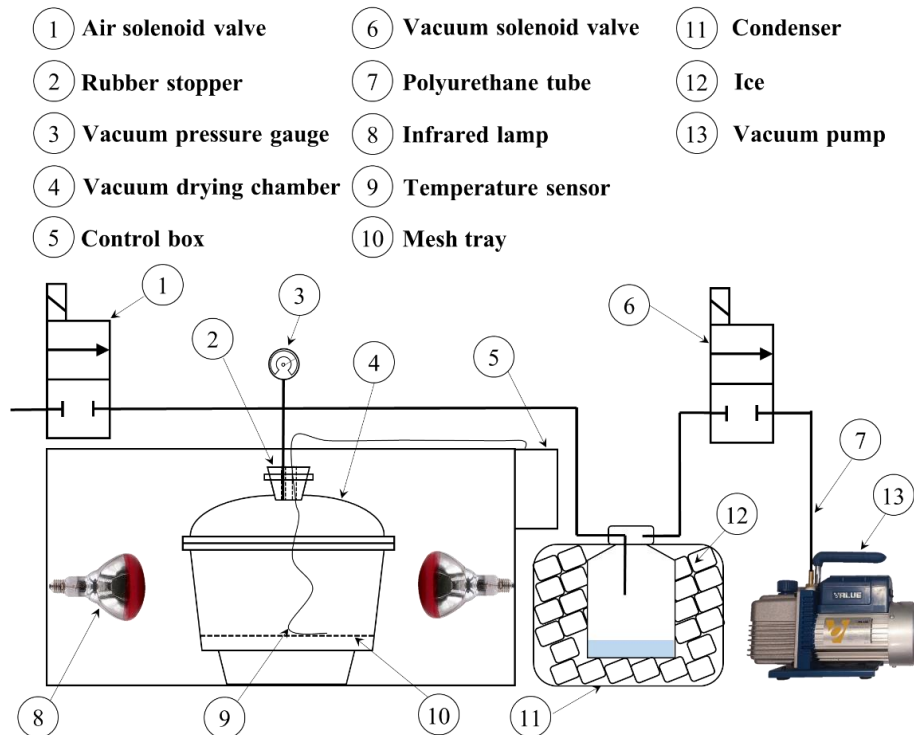


Figure 1 Schematic of the PVI drying system.

2. วงจรไฟฟ้าและการควบคุมอุปกรณ์

Figure 2 แผนภาพวงจรไฟฟ้าสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ ในระบบอบแห้ง ในส่วนของวงจรแรงดันต่ำ (Low-voltage circuit) ซึ่งถูกติดตั้งในกล่องควบคุม (Control box ใน Figure 1) มีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12 VDC (12 VDC power supply) เป็นแหล่งพลังงานให้กับโซลินอยด์วาล์วอากาศ, โซลินอยด์วาล์วสุญญากาศ และตัวลดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (LM2596) จำนวน 2 ตัว แรงดันไฟฟ้า 12 VDC จะถูกลดลงเป็น 3 VDC และ 5 VDC แรงดัน 3 VDC ถูกจ่ายให้กับบอร์ดประมวลผล

ซึ่งมีไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 (ESP32-WROOM32, Espressif Systems Co. Ltd., Shanghai, China) เป็นหน่วยประมวลผลกลางและบอร์ดรีเลย์ 4 ช่อง แรงดัน 5 VDC ถูกจ่ายให้กับบอร์ดรีเลย์ 1 ช่อง, เซ็นเซอร์อุณหภูมิ (DS18B20), บอร์ด RTC (Real time clock) (DS3231), หน้าจอ LCD (LCD1602+I²C) และโซลิดสเตตรีเลย์ (Solid state relay) (SSR-40 DA, Fotek Controls Co. Ltd., Taipei, Taiwan) ในส่วนของวงจรแรงดันสูง (High-voltage circuit) ประกอบด้วยหลอดไฟอินฟราเรด และปั๊มสุญญากาศ ซึ่งใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1-phase 220 VAC

Figure 3 แผนผังเงื่อนไขการควบคุมระบบอบแห้ง ซึ่งประกอบด้วยแผนผังการควบคุมการให้ความร้อน (Figure 3a) และแผนผังการควบคุมการทำสุญญากาศ (Figure 3b) แยกอิสระต่อกัน ในการควบคุมการให้ความร้อน เมื่อระบบอบแห้งเริ่มทำงานระบบจะวัดและแสดงอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งบนหน้าจอ LCD เมื่อระบบตรวจพบว่าอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งต่ำกว่า 60°C หลอดไฟอินฟราเรดจะถูกเปิดให้ส่องสว่างเป็นเวลา 2 min แล้วจึงดับลงโดยอัตโนมัติ ในการควบคุมการทำสุญญากาศ ปัมป์และโซลินอยด์วาล์วจะถูกควบคุมการทำงานให้สร้างวัฏจักรการทำสุญญากาศแบบพัลส์ดังกล่าวก่อให้เกิดความดันภายในห้องอบแห้งเปลี่ยนแปลงดังกราฟใน Figure 4 โดยใน 1 วัฏจักรประกอบด้วย 4 ช่วงการทำงานได้แก่

1. ช่วงลดความดัน หรือ ช่วงเวลา t_s เป็นช่วงที่ระบบอบแห้งลดความดันในห้องอบแห้งจากความดันบรรยากาศ (P_A) ลงเป็นสุญญากาศ (P_V) โดยสั่งงานให้โซลินอยด์วาล์วสุญญากาศเปิด, ปัมป์ทำงาน และโซลินอยด์วาล์วอากาศปิด ในงานวิจัยนี้

กำหนดให้ช่วงเวลาลดความดันเท่ากับ 15 s ในทุกเงื่อนไขการทดสอบ

2. ช่วงรักษาสุญญากาศ หรือ ช่วงเวลา t_{VP} เป็นช่วงที่โซลินอยด์วาล์วทั้ง 2 ตัวปิด และปั๊มหยุดการทำงาน โดยที่ความดันในห้องอบแห้งจะถูกรักษาให้อยู่ในสภาวะสุญญากาศ ซึ่งในงานวิจัยนี้ความดันเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง -57.0 ถึง -46.2 kPa

3. ช่วงกลับสู่บรรยากาศ หรือ ช่วงเวลา t_u เป็นช่วงที่โซลินอยด์วาล์วอากาศเปิด ในขณะที่โซลินอยด์วาล์วสุญญากาศปิด และปั๊มยังคงไม่ทำงาน ทำให้ความดันในห้องอบแห้งเพิ่มขึ้นกลับเข้าสู่ความดันบรรยากาศ เวลาที่ความดันในห้องอบแห้งกลับสู่ความดันบรรยากาศในทุกเงื่อนไขการทดลองอยู่ที่ 3 s

4. ช่วงคงความดันบรรยากาศ หรือ ช่วงเวลา t_{AP} เป็นช่วงที่ความดันในห้องอบแห้งถูกรักษาไว้ที่ความดันบรรยากาศ ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ช่วงความดันบรรยากาศเท่ากับ 3 min 57 s ในทุกเงื่อนไขการทดสอบ ดังนั้น ที่เงื่อนไขการทดสอบอัตราส่วนพัลส์ $t_{VP}:t_{AP}$ เท่ากับ 8:4, 13:4 และ 18:4 ช่วงรักษาสุญญากาศ (t_{VP}) จะเท่ากับ 7 min 45 s, 12 min 45 s และ 17 min 45 s ตามลำดับ

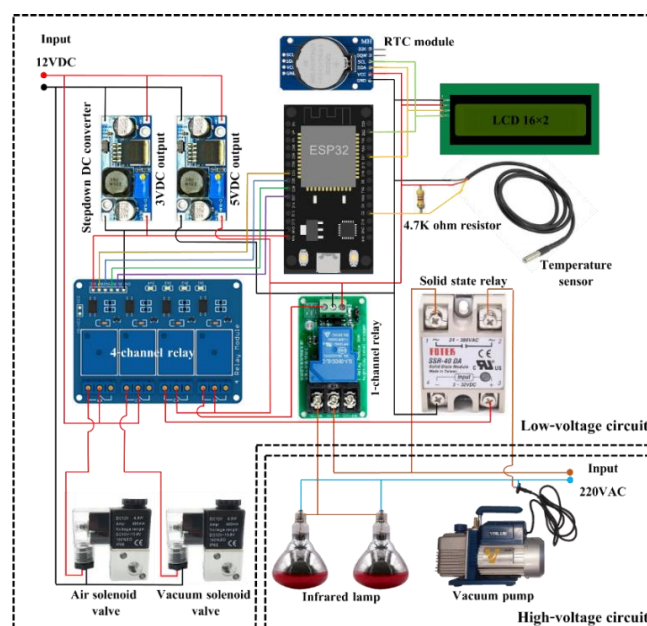


Figure 2 Wiring diagram of electrical components of the PVI drying system.

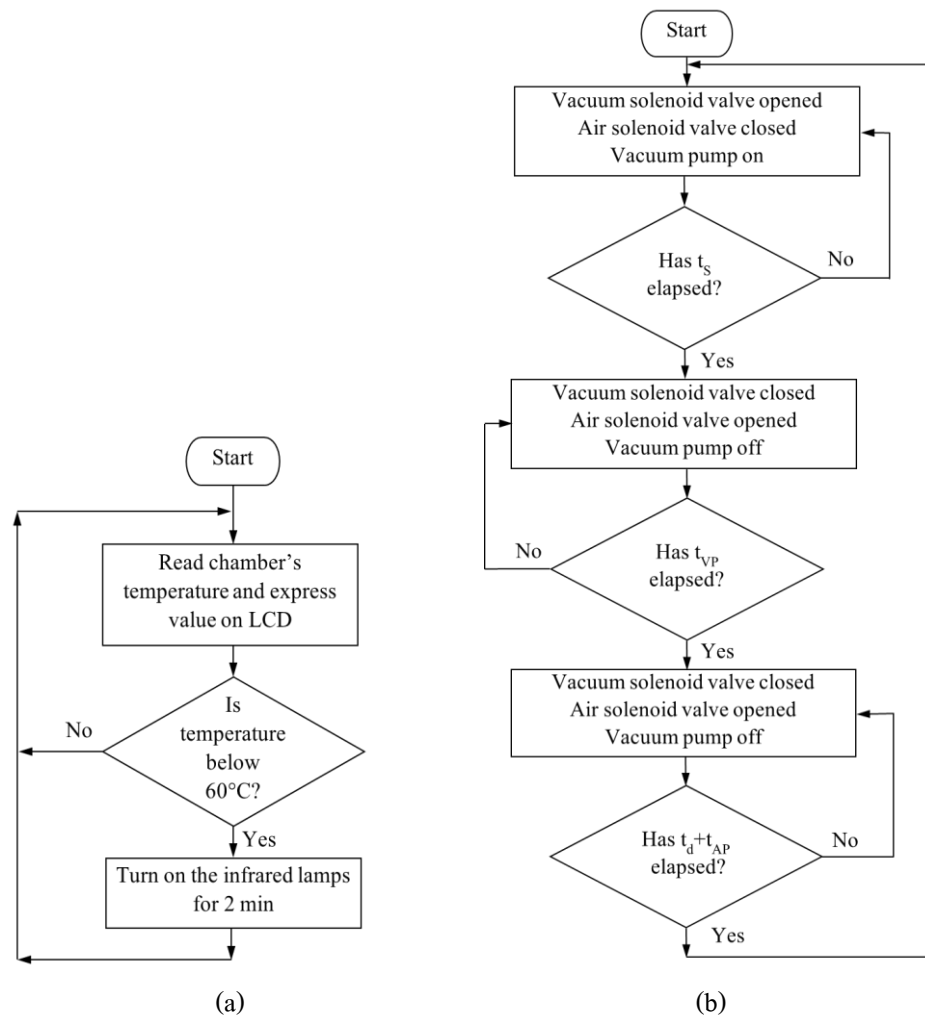


Figure 3 Flow chart of the (a) temperature and (b) vacuum control schemes.

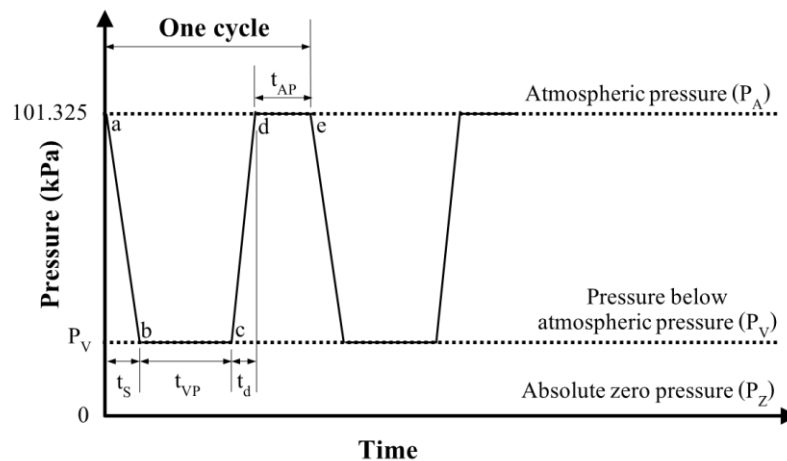


Figure 4 Pressure cycle diagram of the pulsed vacuum drying process in which a cycle consists of evacuation (t_s), vacuum-holding (t_{vp}), releasing (t_d) and atmospheric-pressure (t_{AP}) periods. (Adapted from Zhou *et al.* (2022))

3. แผนการทดสอบและประเมินสมรรถนะของระบบ

งานวิจัยนี้เลือกใช้ตะไคร้ (*Cymbopogon citratus*) เป็นตัวอย่างผลิตภัณฑ์อบแห้ง ทำการทดสอบและประเมินสมรรถนะของระบบอบแห้ง PVI โดยการอบแห้งตะไคร้แห้งที่ 3 อัตราส่วนพลัง $t_{VP}:t_{AP}$ เท่ากับ 8:4, 13:4 และ 18:4 อย่างละ 3 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับการตากแห้งด้วยแสงแดด ต้นตะไคร้สดถูกซื้อจากตลาดในพื้นที่ อ.บางแพ จ.ราชบุรี ต้นตะไคร้จะถูกล้างด้วยน้ำประปา, ซับด้วยกระดาษทิชชู และผึ่งไว้ให้แห้งในสภาวะห้องประมาณ 30 min จากนั้น จะถูกหั่นเป็นแว่นแต่ละชิ้นหนา 2 - 3 mm โดยเริ่มหั่นจากส่วนโคนเป็นระยะประมาณ 20 cm ต้นตะไคร้จะถูกชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง (WT2002N, Want Balance Instrument Co. Ltd., Jiangsu, China) ให้ได้ 150 g ซึ่งจะถูกใช้เป็นตัวอย่างสำหรับการทดสอบอบแห้ง 1 ชั่วโมง ซึ่งจะถูกล้างกระจายบนถาดตะแกรง (Figure 1) และจะถูกวัดความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้น (Electromagnetic moisture meter) (Smart

$$\text{Moisture ratio} = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

ในส่วนการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบอบแห้ง PVI ผู้วิจัยกำหนดพารามิเตอร์สำหรับการศึกษาเปรียบเทียบได้แก่ 1. อัตราการแห้ง (Drying rate, $\text{g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}} \cdot \text{min}$) ของตะไคร้ซึ่งคำนวณได้ตามสมการ (3) (Demiray and Tulek, 2012)

$$\text{Drying rate} = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (3)$$

โดยที่ M_{t+dt} คือ ค่าความชื้นของตะไคร้ที่เวลา $t+dt$ (%_{db}) และ dt คือ ช่วงเวลาที่เพิ่มขึ้น (min) 2. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy

Sensor AS981, Dongguan Wanchuang Electronic Products Co., Ltd, Dongguan, China) ทำการอบแห้งด้วยอัตราส่วนพลังที่กำหนดจนกระทั่งวัดความชื้นต้นตะไคร้แห้งได้ต่ำกว่า 11%_{db}. ในขณะอบแห้งในทุก ๆ วินาทีการทำความเย็นอากาศ ณ ช่วงเวลาคงความดันบรรยากาศ t_{AP} ผู้วิจัยเปิดฝาท้องอบแห้ง เพื่อวัดความชื้นของต้นตะไคร้ด้วยเครื่องวัดความชื้น การคำนวณหาอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio) สามารถประยุกต์ใช้สมการ (1)

$$\text{Moisture ratio} = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

โดยที่ M_t คือ ค่าความชื้นของตะไคร้ที่เวลา t (%_{db}), M_0 คือ ค่าความชื้นเริ่มต้นของตะไคร้ (%_{db}) และ M_e คือ ค่าความชื้นสมดุลของตะไคร้ (%_{db}) เนื่องจากค่า M_e มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ M_t และ M_0 (Deng *et al.*, 2021; Dissa *et al.*, 2011) ดังนั้น ค่าอัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

consumption - SEC) ในหน่วย $\text{MJ}/\text{g}_{\text{water}}$ ของระบบอบแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการ (4) (Srivichai, 2016)

$$\text{SEC} = \frac{3.6 E_p}{m_{in} - m_f} \quad (4)$$

เมื่อ E_p คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง ($\text{kW} \cdot \text{h}$), m_{in} และ m_f คือ น้ำหนักของต้นตะไคร้แห้ง (g) ก่อนและหลังอบแห้ง ตามลำดับ ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งแต่ละชั่วโมงวัดโดยมิเตอร์ไฟฟ้า (Watt-hour meter) (MF-33E, Mitsubishi Electric Automation (Thailand) Co. Ltd., Bangkok, Thailand)

การทดสอบตากแห้งถูกดำเนินการไปพร้อม ๆ กับการทดสอบอบแห้ง โดยที่ขึ้นตะไคร้หั่นน้ำหนัก 150 g จะถูกวางบนถาดตะแกรงเช่นเดียวกับเงื่อนไขอบแห้ง แล้วจึงถูกนำไปตากแดดตั้งแต่วันที่ 10:00 น. เป็นต้นไป ขึ้นตะไคร้หั่นถูกวัดความชื้นทุก ๆ 1 h และจะเสร็จสิ้นการตากแดดเมื่อวัดความชื้นขึ้นขึ้นตะไคร้หั่นได้ต่ำกว่า 11%_{db}.

4. วิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

ค่าใช้จ่ายคงที่ (Fixed cost) ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยค่าเสื่อมราคา (Depreciation) (i.e., ค่าเสื่อมของระบบอบแห้งแบบ PVI มีอายุการใช้งาน 10 years คัดการณ์จากอายุการใช้งานปั๊มสุญญากาศ) และราคาของหลอดไฟอินฟราเรดที่มีอายุการใช้งาน 5,000 h โดยกำหนดให้เปลี่ยนใหม่ทุก ๆ 1 year เป็นต้น ค่าใช้จ่ายผันแปร (Variable cost) เป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน โดยประกอบไปด้วยค่าการใช้พลังงาน, ค่าบำรุงรักษา (i.e., เปลี่ยนถ่ายน้ำมันปั๊มสุญญากาศทุก ๆ 1 year), ค่าตะไคร้สด และค่าแรง เป็นต้น การคำนวณหาจุดคุ้มทุน (Break-even point - BEP) ในหน่วย Baht/year สามารถคำนวณได้จากสมการ (5)

$$\text{BEP} = \frac{\text{Fixed cost}}{\text{Contribution margin}} \quad (5)$$

โดยที่ Contribution margin คือกำไรส่วนเพิ่ม (day/year) ซึ่งคิดจากผลต่างระหว่างรายได้และต้นทุนต่อวัน ระยะเวลาคืนทุน (Payback period - PB) ในหน่วย year สามารถคำนวณได้จากสมการ 6

$$\text{PB} = \frac{\text{Initial investment}}{\text{Cash inflow per period}} \quad (6)$$

โดยที่ Initial investment คือต้นทุนสุทธิเริ่มต้นหรือราคาต้นทุนของระบบอบแห้งแบบ PVI (Baht) และ

Cash inflow per period คือเงินสดรับสุทธิรายปี (Baht/year)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ตัวอย่างกราฟอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องอบแห้งสุญญากาศในระหว่างการทดสอบ 1 ชั่วโมงการทดสอบระบบอบแห้งถูกแสดงอยู่ใน Figure 5a ภาพขยายของกราฟอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในห้องอบแห้งในระหว่างการทดสอบที่เงื่อนไขอัตราส่วนพัลส์ $t_{VP}:t_{AP}$ เท่ากับ 8:4 ถูกแสดงอยู่ใน Figure 5b จะเห็นได้ว่าที่ทุกเงื่อนไขการทดสอบ ระบบอบแห้งสามารถควบคุมอุณหภูมิในห้องอบแห้งอยู่ในช่วง 57 - 63°C ตั้งแต่ต้นจนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขการออกแบบที่กำหนดไว้ นอกจากนี้ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องอบแห้งมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 30 - 50% โดยจะเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นวัฏจักรตามวัฏจักรการทำสุญญากาศแบบพัลส์อย่างชัดเจน (Figure 5b) กล่าวคือ ใน 1 วัฏจักรการทำสุญญากาศแบบพัลส์ประกอบด้วย ช่วงที่ความชื้นสัมพัทธ์ลดลงอย่างรวดเร็ว (ช่วงเวลาลดความดัน t_d), ช่วงที่ความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ (ช่วงเวลารักษาสุญญากาศ t_{VP}), ช่วงที่ความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (ช่วงเวลากลับสู่บรรยากาศ t_r) และช่วงที่ความชื้นสัมพัทธ์ค่อนข้างคงที่ (ช่วงเวลาคงความดันบรรยากาศ t_{AP}) ทั้งนี้ ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของแต่ละชั่วโมงการทดสอบมีแนวโน้มลดลงอย่างช้า ๆ เมื่อระยะเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับความชื้นของตัวอย่างตะไคร้ (Figure 7)

Figure 6 กราฟปริมาณการใช้พลังงานของระบบอบแห้งในระหว่างการทดสอบ 1 ชั่วโมงการทดสอบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการใช้พลังงานของระบบค่อนข้างคงที่ (ปริมาณการใช้

พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรง) โดยที่เงื่อนไข $t_{VP}:t_{AP}$ เท่ากับ 8:4 และ 13:4 ระบบใช้พลังงานในอัตราใกล้เคียงกัน แต่ที่เงื่อนไข $t_{VP}:t_{AP}$ เท่ากับ 18:4 ระบบใช้พลังงานในอัตราที่ต่ำกว่า ค่าเฉลี่ยความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ทั้ง 3 เงื่อนไขมีค่าเท่ากับ 0.019, 0.029 และ 0.031 MJ/g_{water} ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Kusuma *et al.* (2023) ที่อบแห้งตะไคร้ด้วยไมโครเวฟขนาด 264 W และพบว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ในช่วง 0.012 - 0.025 MJ/g_{water} (คำนวณมาจาก 3.3835 - 6.9772 kW·h/kg_{water}) ในงานวิจัยดังกล่าวยังพบว่าความ

สิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีแนวโน้มน้อยลงเมื่อใช้ตะไคร้หั่น ในปริมาณที่มากสำหรับอบแห้ง นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับผลของ Manangan and Witinantakit (2020) ซึ่งอบแห้งดอกบัวด้วยวิธีการแบบ PVI ที่เงื่อนไข $t_{VP}:t_{AP}$ เท่ากับ 15:4 พบว่ามีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 0.74 MJ/g_{water} โดยมีความสูงกว่าหลายเท่า เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานกว่า (ประมาณ 9 h) และความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ที่อบแห้ง

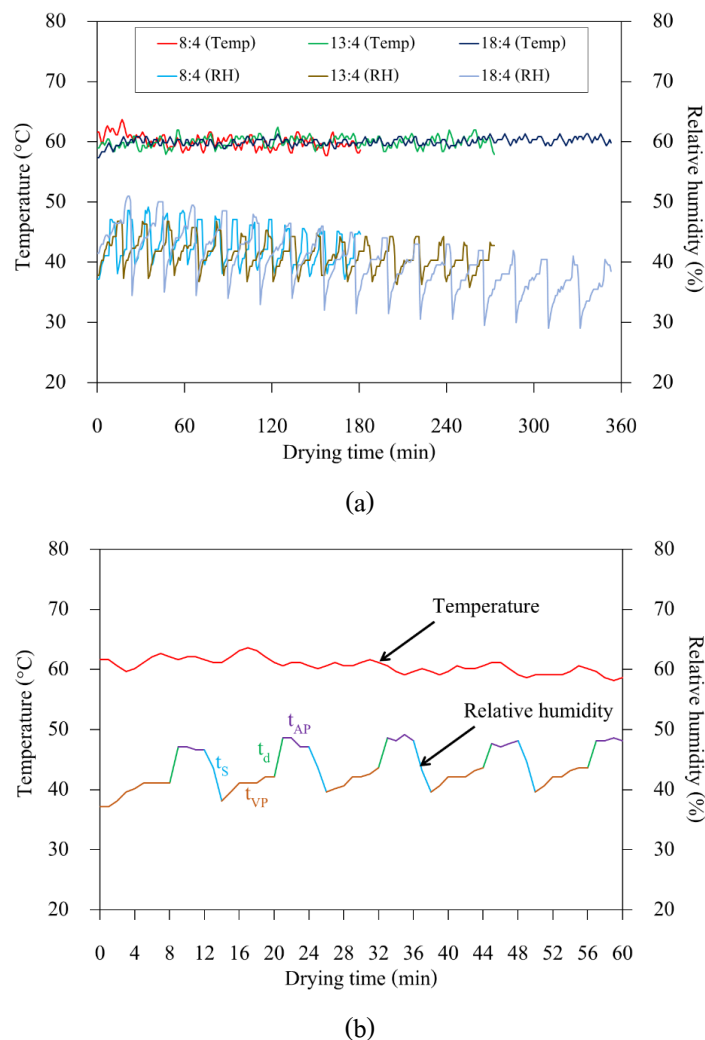


Figure 5 (a) Air temperature and relative humidity in the vacuum drying chamber during one replicate of each of the three $t_{VP}:t_{AP}$ test conditions, and (b) the temperature and relative humidity data of the 8:4 test condition with the horizontal time scale magnified between 0 and 60 min.

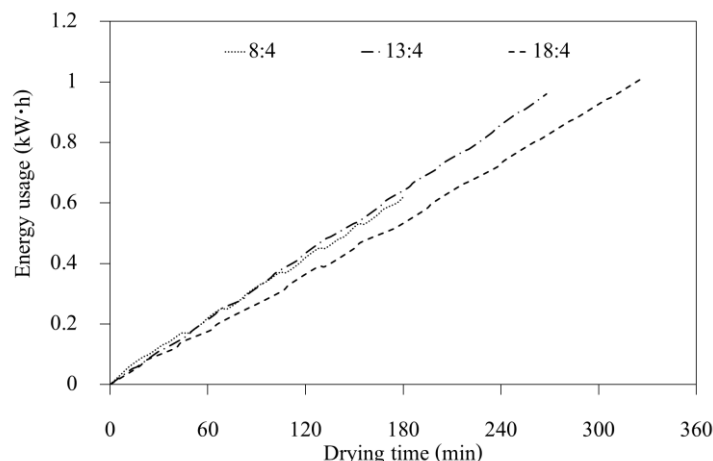


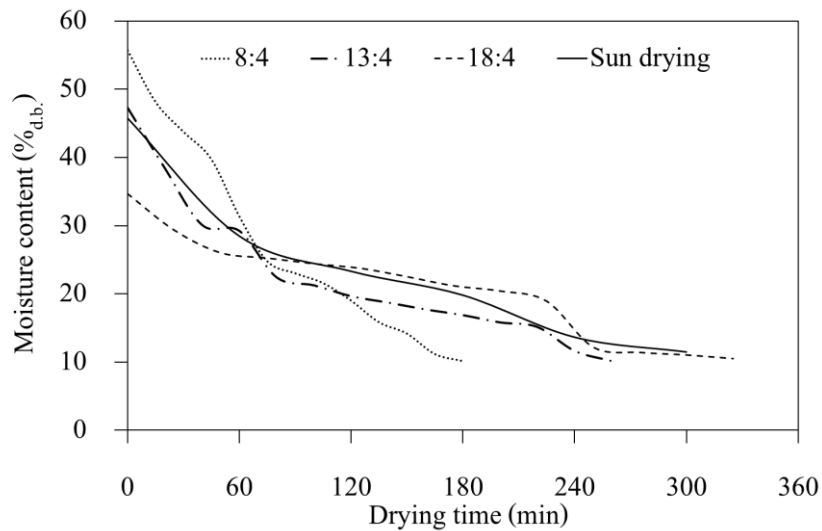
Figure 6 Energy consumption during one replicate of each of the three drying test conditions.

Figure 7a กราฟความชื้นของชิ้นตะไคร้หั่น ในระหว่างการอบแห้งและการตากแดด ในระหว่างการการอบแห้งทุกเงื่อนไขและการตากแดด อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกห้องอบแห้งเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง $35 - 45^{\circ}\text{C}$ และ $44 - 65\%$ ตามลำดับ สำหรับเงื่อนไขการตากแดด ตะไคร้มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ $45\%_{\text{d.b.}}$ และใช้ระยะเวลาตากแห้งประมาณ 300 min ถึงแม้ว่า ความชื้นเริ่มต้นของตะไคร้ที่แต่ละเงื่อนไขการทดสอบระบบอบแห้งมีค่าแตกต่างกัน ในช่วง 60 min แรกของการทำแห้ง ความชื้นตะไคร้จะลดลงอย่างรวดเร็ว (กราฟมีความชันมากกว่าช่วงหลัง 60 min เป็นต้นไป) นอกจากนี้ ข้อมูลอัตราการทำแห้งของตะไคร้หั่นที่แต่ละเงื่อนไขการทดสอบ (Figure 7c) มีอัตราการทำแห้งเพิ่มขึ้นก่อนในช่วงต้นของการทำแห้ง (ช่วง 60 min) แล้วจึงลดลง เนื่องจากวัสดุมีปริมาณน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่มากทำให้ง่ายต่อการดึงน้ำออกในช่วงต้น (Jiang *et al.*, 2022) ในขณะที่ Figure 7b กราฟอัตราส่วนความชื้นของตะไคร้หั่น โดยเส้นแนวโน้มของอัตราส่วนความชื้นของตะไคร้หั่นที่ทุกเงื่อนไขจะลดลงถึงจุดหนึ่ง แล้วจะมีแนวโน้มการลดลงที่น้อยลงยกตัวอย่าง ที่เงื่อนไขอัตราส่วนพัลส์ $t_{\text{VP}}:t_{\text{AP}}$ เท่ากับ 18:4 ซึ่งตะไคร้มีอัตราส่วนความชื้นลดลงถึง 0.35

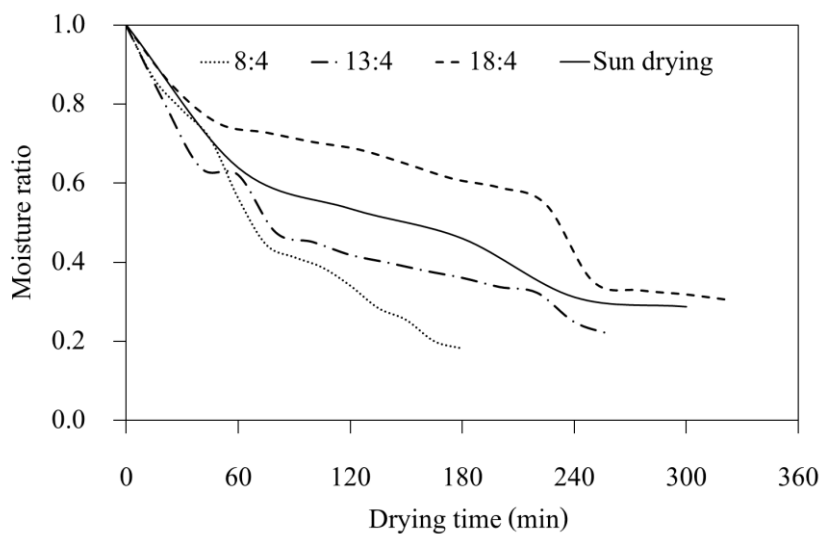
ที่เวลา 240 min จากนั้น การลดลงจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากซึ่งพบว่าอัตราส่วนความชื้นเป็น 0.32 ที่เวลา 300 min เป็นต้น Figure 7a ที่เงื่อนไขอัตราส่วนพัลส์ $t_{\text{VP}}:t_{\text{AP}}$ เท่ากับ 8:4 ซึ่งตะไคร้มีความชื้นเริ่มต้นสูงสุด (ประมาณ $55\%_{\text{d.b.}}$) ระบบใช้ระยะเวลาอบแห้งสั้นที่สุด (ประมาณ 180 min) ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขการออกแบบที่กำหนดไว้ แต่ที่เงื่อนไขอัตราส่วนพัลส์ $t_{\text{VP}}:t_{\text{AP}}$ เท่ากับ 18:4 ซึ่งตะไคร้มีความชื้นเริ่มต้นต่ำสุด (ประมาณ $35\%_{\text{d.b.}}$) ระบบใช้ระยะเวลาอบแห้งนานที่สุด (ประมาณ 330 min) ในขณะเดียวกัน ที่เงื่อนไข $t_{\text{VP}}:t_{\text{AP}}$ เท่ากับ 13:4 และการตากแห้ง ความชื้นเริ่มต้นของตะไคร้ใกล้เคียงกันที่ประมาณ $45 - 47\%_{\text{d.b.}}$ และใช้ระยะเวลาทำแห้งใกล้เคียงกันที่ประมาณ 270 min สังเกตว่า การใช้ช่วงเวลารักษาสุญญากาศ (t_{VP}) นานที่สุดไม่ได้ทำให้ระบบใช้ระยะเวลาอบแห้งสั้นที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Xie *et al.* (2017a) ที่พบว่าการทำแห้งโกลจิเบอร์รี่ที่เงื่อนไข t_{VP} เท่ากับ 20 min ให้ระยะเวลาการทำแห้งนานกว่าที่เงื่อนไข t_{VP} เท่ากับ 15 min วัฏจักรสุญญากาศแบบพัลส์ (Pulsed vacuum cycle) เป็นการทำลายสมดุลของความดันไอน้ำระหว่างภายในและภายนอกวัสดุอบแห้งอย่างฉับพลัน ทำให้ช่องว่างหรือรูพรุนขนาดเล็กในวัสดุขยายตัวเชื่อมต่อกัน (Xie *et al.*, 2017b) ซึ่ง

เรียกปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “Tunneling effect” (Liu *et al.*, 2021) ส่งผลให้น้ำภายในวัสดุสามารถแพร่ออกไปยังผิวของวัสดุได้ง่ายขึ้น ทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาจำนวนรอบของวัฏจักรสุญญากาศแบบพัลส์ตั้งแต่เริ่มจนถึงสิ้นสุดการอบแห้ง ที่เงื่อนไขอัตราส่วนพัลส์ $t_{VP}:t_{AP}$ เท่ากับ 8:4, 13:4 และ 18:4 ระบบอบแห้งใช้จำนวนรอบของวัฏจักรใกล้เคียงกันคือ 15, 16 และ 16 รอบ ตามลำดับ จึงเป็นไปได้ว่า เมื่อความดันไอน้ำระหว่างภายในและภายนอกชั้นตะไคร้เข้าสู่ภาวะสมดุล การคงสถานะ

สุญญากาศไว้ไม่ส่งผลต่อการอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น แต่เมื่อสมดุลดังกล่าวถูกทำลายลง โดยการเริ่มวัฏจักรสุญญากาศถัดไปทำให้ช่องว่างรูพรุนในชั้นตะไคร้เชื่อมต่อกันมากขึ้น นำไปสู่อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ดังนั้น การใช้ระบบอบแห้ง PVI ในงานวิจัยนี้ จำเป็นต้องเลือกอัตราส่วนพัลส์ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ระบบที่เหมาะสมที่สุด (ระยะเวลาอบแห้งสั้นสุด และใช้พลังงานต่ำสุด) ซึ่งหากเลือกอัตราส่วนพัลส์ให้เหมาะสม ระบบอบแห้ง PVI สามารถลดระยะเวลาอบแห้งได้อย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับการตากแดด



(a)



(b)

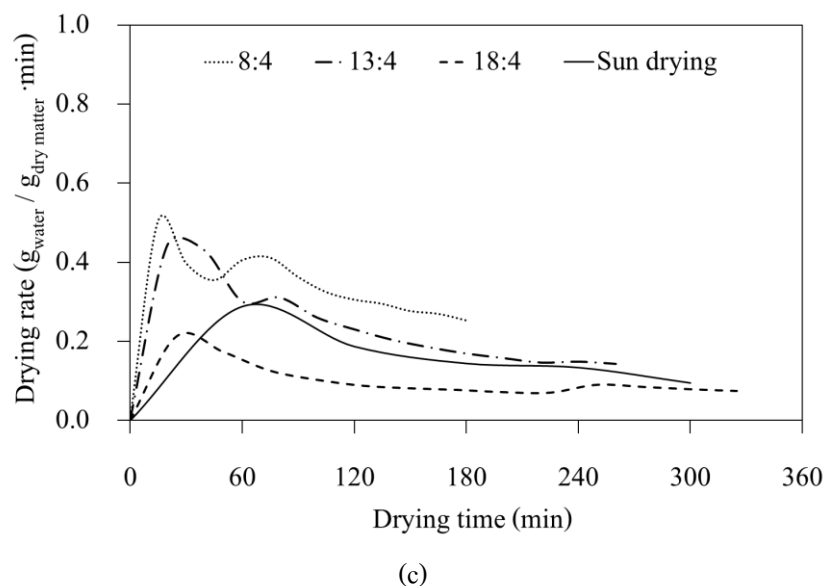


Figure 7 (a) Moisture contents, (b) moisture ratios and (c) drying rates of *Cymbopogon citratus* samples during pulsed vacuum infrared (PVI) drying and sun drying.

ต้นทุนค่าวัสดุอุปกรณ์สำหรับจัดสร้างระบบอบแห้งแบบ PVI ที่ถูกพัฒนาขึ้นในการวิจัยนี้คิดเป็น 10,450 baht (Table 1) ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขการออกแบบที่กำหนดไว้ จะเห็นได้ว่า ต้นทุนค่าปั๊มสุญญากาศและโถแก้วรวมกันคิดเป็นประมาณ 70% ของทุนทั้งหมดและต้นทุนอุปกรณ์ควบคุมระบบคิดเป็นต้นทุนต่ำกว่า 30% สำหรับการทดสอบอบแห้งชิ้นตะไคร้หั่น ระบบอบแห้งใช้พลังงานไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.6 - 1.2 kW·h/batch (Figure 6) คิดเป็นค่าไฟฟ้าประมาณ 2 - 4 Baht ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมถูกแสดงใน Table 2 โดยค่าเสื่อมราคาของระบบอบแห้งแบบ PVI ที่มีอายุการใช้งาน (Useful life) 10 years ถูกคำนวณตามสมการที่ 7 และมีค่าเท่ากับ 900 Baht/year

$$\text{Depreciation} = \frac{\text{Initial investment} - \text{Salvage value}}{\text{Useful life}} \quad (7)$$

โดยที่ Salvage value คือ ราคาซากซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,045 Baht ดังนั้น ค่าใช้จ่ายคงที่ซึ่งเป็นผลรวม

ระหว่างค่าเสื่อมราคาของระบบอบแห้งและราคาของหลอดไฟ 2 หลอด มีค่าเป็น 1,198 Baht/year ในงานวิจัยนี้ กำหนดให้ระยะเวลาในการทำงานต่อวันของระบบอบแห้งเป็น 4 batch/day และจำนวนวันในการทำงานต่อปีเป็น 300 days /year อัตราส่วนพัลส์ที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้คือ $t_{vp}:t_{Ap}$ เท่ากับ 8:4 โดยมีระยะเวลาในการทำแห้งต่อ 3 h/batch และมีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุดเป็น 0.6 kW·h/batch ต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าเป็น 3.25 Baht/unit (1 unit เท่ากับ 1 kW·h) ดังนั้น ค่าใช้จ่ายด้านการใช้พลังงานมีค่าเป็น 2,340 Baht/year ค่าใช้จ่ายด้านวัตถุดิบซึ่งเป็นตะไคร้สดมีค่าเป็น 3,960 Baht/year (คิดจากราคาตามท้องตลาด 22 Baht/kg) ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเป็นค่าเปลี่ยนถ่ายน้ำมันปั๊มสุญญากาศปีละ 1 ครั้ง เป็น 138 Baht/year ค่าจ้างแรงงานคนบรรจุและเก็บตะไคร้แห้งซึ่งใช้เวลาอย่างมากโดยรวมตลอดทั้ง 4 batch ใช้เวลาเพียง 15 min ด้วยเหตุนี้ ค่าจ้างแรงงานจึงคิดค่าแรงเป็นนาที โดยมีค่าเป็น 10.37 Baht/day ซึ่งอ้างอิงจากประกาศราชกิจจานุเบกษา ประกาศคณะกรรมการค่าจ้างเรื่องอัตราค่าจ้างขั้นต่ำ

ซึ่งมีค่าเท่ากับ 332 Baht/8 h ดังนั้น ค่าใช้จ่ายผันแปร มีค่าเป็น 9,549 Baht/year จุดคุ้มทุนและระยะเวลาคืนทุนของระบบอบแห้งแบบ PVI มีค่าเป็น 205.15 day/year และ 6.48 year ตามลำดับ Saengsuwan (2021) ได้วิเคราะห์การคืนทุนเครื่องอบแห้งบ่มความร้อนสำหรับอบแห้งดอกเก๊กฮวย โดยมีต้นทุน 150,000 Baht และการคืนทุนอยู่ที่ 3 month กับ 17 day เครื่องอบแห้งดังกล่าวใช้เวลา 8 h ในการอบแห้ง และได้ปริมาณดอกเก๊กฮวยแห้ง 9 kg โดยมีราคาจำหน่ายกิโลกรัมละ 500 Baht Amornnantasiri (2021) ได้วิเคราะห์การคืนทุนเครื่องอบแห้งแบบมัลติโพล์ดันแบบสำหรับการอบแห้งหอมแดง โดยมีต้นทุน 200,000 Baht และระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 4 years กับ 2 months เครื่องอบแห้งดังกล่าวใช้เวลาในการอบแห้ง 3 h และในระยะเวลา 1 day สามารถผลิตหอมแดงแห้งได้ 1.2 kg โดยมีราคาจำหน่ายกิโลกรัมละ 700 Baht Amornnantasiri (2021) ได้ให้เหตุผลว่าเนื่องจากต้นทุนด้านพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งหอมแดงที่สูงและกำลังการผลิตที่ค่อนข้างต่ำ จึงส่งผลให้มีระยะเวลาในการคืนทุนที่ช้า ในขณะที่เครื่องอบแห้งของ Saengsuwan (2021) ให้กำลังการผลิตต่อวันที่ค่อนข้างสูง และสามารถผลิตได้ 2 รอบต่อวัน จึงทำให้ระยะเวลาในการคืนทุนที่เร็วกว่า ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยต่าง ๆ พบว่าระบบอบแห้งแบบ PVI นี้ยังมีต้นทุนของเครื่องที่ต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม เนื่องจากราคาของผลิตภัณฑ์ได้ในงานวิจัยนี้มีราคาถูกลง และปริมาณผลผลิตที่ได้รับที่น้อย จึงส่งผลให้ระยะเวลาในการคืนทุน

ช้ากว่าอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้ในทางปฏิบัติ ผู้สนใจอาจจะเพิ่มขนาดของภาชนะในการบรรจุหรือจำนวนถาดที่ใช้ในการวางผลผลิตเพื่อเพิ่มปริมาณผลผลิต โดยจะทำให้ระยะเวลาในการคืนทุนลดลงได้นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบราคาเครื่องอบแห้งตามท้องตลาด เช่น เครื่องอบลมร้อนซึ่งมีชั้นวางจำนวน 10 ชั้น (ขนาด $0.4 \times 4.7 \times 4.3$ cm) และใช้กำลังไฟฟ้า 1,000 W มีราคา 4,590 Baht (Anonymous, 2023) ซึ่งถูกกว่าต้นทุนการผลิตระบบอบแห้งแบบ PVI อย่างไรก็ตาม ข้อมูลของ Tirawanichakul *et al.* (2013) ได้แสดงการเปรียบเทียบการอบแห้งตะไคร้หั่นระหว่างการอบด้วยลมร้อนอย่างเดียวและการอบด้วยรังสีอินฟราเรด (1,000 W) อย่างเดียวที่อุณหภูมิเดียวกัน (60°C) พบว่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งตะไคร้หั่นด้วยลมร้อนมีค่ามากกว่าประมาณ 2 เท่า และ Tirawanichakul *et al.* (2011) ทดลองเปรียบเทียบการอบขนุนแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (1,000 W) อย่างเดียวและการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียวที่อุณหภูมิ 59.7°C พบว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดใช้เวลาน้อยกว่า 30% ดังนั้น เครื่องอบแห้งผลไม้มีแนวโน้มที่จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานกว่า แต่จะได้ผลผลิตที่สูงกว่าเนื่องจากจำนวนของถาดที่มากกว่า ในงานวิจัยนี้สามารถกล่าวได้ว่าระบบอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดต้นทุนต่ำสามารถอบแห้งผลผลิตเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผู้สนใจสามารถจัดหาอุปกรณ์เพื่อสร้างใช้งานได้ด้วยตนเอง

Table 1 Summary of the cost of each component of the PVI drying system.

Equipment	Quantity	Unit	Cost (Baht per unit)	Total cost (Baht)
Air solenoid valve	1	Piece	390	390
Vacuum solenoid valve	1	Piece	390	390
Rubber stopper	1	Piece	20	20
Vacuum pump	1	Piece	4,290	4,290
Desiccator (9,500 cm ³)	1	Piece	3,290	3,290
Control box (19×23 cm)	1	Piece	139	139
Polyurethane (PU) tube (Ø.in 6.5 mm)	2	Meter	8	16
Ice bucket (26×38×32.5 cm ³)	1	Piece	129	129
Glass bottle (650 cm ³)	1	Piece	20	20
Infrared lamp (250 W)	2	Piece	149	298
lamp holder (E27)	2	Piece	34	68
Temperature sensor + 4.7K ohm resistor	1	Piece	39	39
12 VDC Power supply	1	Piece	118	118
DC to DC converter	2	Piece	28	56
ESP32 module	1	Piece	198	198
RTC module	1	Piece	98	98
Relay 1 channel 5VDC	1	Piece	100	100
Relay 4 channels 3VDC	1	Piece	128	128
Solid state relay	1	Piece	98	98
Black film faced plywood (120×240×15 cm)	1	Plate	465	465
Wires			100	100
			Total (Baht)	10,450

Table 2 Economy engineering for the PVI drying system.

Lists	Amount	Unit
Initial investment for PVI drying system	10,450	Baht
Useful life	10	year
Salvage value	1,045	Baht
Depreciation	900	Baht/year
Lifetimes of infrared lamps (5,000 h)	298	Baht/year

Table 2 (Continuous)

Lists	Amount	Unit
Fixed cost	1,198	Baht/year
Working time per day	4	batch/day
Working time per year	300	day/year
Electricity bill	3.25	Baht/unit
Energy usage	0.6	kW·h/batch
	or 2,340	Baht/year
Fresh <i>Cymbopogon citratus</i> cost	22	Baht/kg
	or 3,960	Baht/year
Maintenance (i.e., draining the fluid from the vacuum pump)	0.46	Baht/day
	or 138	Baht/year
Wages (15 min/4 batch)	10.37	Baht/day
	or 3,111	Baht/year
Variable cost	9,549	Baht/year
Break-even point (BEP)	205.15	day/year
Cash inflow per period	1,613.88	Baht/year
Payback period (PB)	6.48	year

สรุป

ในการพัฒนาระบบอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดต้นทุนต่ำนี้ ผู้วิจัยมุ่งหวังให้ผู้สนใจนำองค์ความรู้ไปพัฒนาต่อยอดได้จากการทดสอบระบบพบว่า 1) ระบบอบแห้งสามารถควบคุมความอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งให้อยู่ในช่วงไม่เกิน 55 - 65°C ซึ่งเป็นช่วงเหมาะสมสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตรแปรรูปที่ไม่ทนความร้อน, 2) เมื่อพิจารณาระยะเวลาอบแห้งที่เงื่อนไขอัตราส่วนพัลส์ $t_{VP}:t_{AP}$ เท่ากับ 8:4, 13:4 และ 18:4 พบว่าที่เงื่อนไขอัตราส่วนพัลส์ $t_{VP}:t_{AP}$ เท่ากับ 8:4 ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด โดยใช้เวลาเพียง 180 min และปริมาณความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 11%_{db}. ในขณะที่ ระยะเวลาอบแห้งที่เงื่อนไขอัตราส่วนพัลส์ $t_{VP}:t_{AP}$ เท่ากับ 13:4 และ 18:4 ใช้ระยะเวลานานกว่า

โดยมีระยะเวลาการอบแห้งเป็น 270 และ 330 min ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงาน พบว่าค่าเฉลี่ยความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่เงื่อนไข $t_{VP}:t_{AP}$ เท่ากับ 8:4 มีค่าน้อยที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 0.019 MJ/g_{water} และมีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 0.6 kW·h ดังนั้น อัตราส่วนพัลส์ที่เหมาะสมสุดกับการอบแห้งในการศึกษาครั้งนี้ (ระยะเวลาอบแห้งสั้นสุด และใช้พลังงานต่ำสุด) คือเงื่อนไข $t_{VP}:t_{AP}$ เท่ากับ 8:4 และ 3) เมื่อพิจารณาต้นทุนค่าวัสดุอุปกรณ์ของระบบอบแห้ง พบว่างบประมาณจัดซื้อวัสดุอุปกรณ์รวมทั้งระบบคิดเป็น 10,450 baht (ไม่เกิน 15,000 baht) และมีระยะเวลาในการคืนทุนเท่ากับ 6.48 year จากผลการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า ระบบอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดต้นทุนต่ำสามารถอบแห้ง

ผลิตผลเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มพื้นที่หน้าตัดภายในโครงสร้างระบบสุญญากาศจะทำให้ปริมาณผลผลิตจากการอบแห้งมีปริมาณมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนางสาวเกษราภรณ์ เกตุรัตน์ สำหรับความช่วยเหลือในการเตรียมตะไคร้และติดตั้งอุปกรณ์

ขอขอบคุณสาขาวิชาอุตสาหกรรมศิลป์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม สำหรับความอนุเคราะห์สถานที่และความอนุเคราะห์อื่น ๆ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับความอนุเคราะห์อุปกรณ์การทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- Amornnantasiri, A. 2021. Development of must flow dryer for drying process of shallot. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Srinakharinwirot University.
- Anonymous. 2023. **Hot air dryer**. Available Source: <https://shorturl.asia/IG0eL>, November 12, 2023.
- Argyropoulos, D. and Müller, J. 2014. Changes of essential oil content and composition during convective drying of lemon balm (*Melissa officinalis* L.). **Industrial Crops and Products** 52: 118-124.
- Buchaillot, A., Caffin, N. and Bhandari, B. 2009. Drying of Lemon Myrtle (*Backhousia citriodora*) Leaves: Retention of Volatiles and Color. **Drying Technology** 27(3): 445-450.

- Demiray, E. and Tulek, Y. 2012. Thin-layer drying of tomato (*Lycopersicum esculentum* Mill. cv. *Rio Grande*) slices in a convective hot air dryer. **Heat Mass Transfer** 48: 841-847.
- Deng, Z., Li, M., Xing, T., Zhang, J., Wang, Y. and Zhang, Y. 2021. A literature research on the drying quality of agricultural products with using solar drying technologies. **Solar Energy** 229: 69-83.
- Dissa, A.O., Bathiebo, D.J., Desmorieux, H., Coulibaly, O. and Koulidiati, J. 2011. Experimental characterisation and modelling of thin layer direct solar drying of Amelie and Brooks mangoes. **Energy** 36(5): 2517-2527.
- Dutta, D., Kumar, P., Nath, A., Verma, N. and Gangwar, B. 2014. Qualities of lemongrass (*Cymbopogon citratus*) essential oil at different drying conditions. **International Journal of Agriculture, Environment & Biotechnology** 7(4): 903-909.
- Figiel, A. and Michalska, A. 2016. Overall Quality of Fruits and Vegetables Products Affected by the Drying Processes with the Assistance of Vacuum-Microwaves. **International Journal of Molecular Sciences** 18(1): 71.
- Jiang, D., Li, C., Lin, Z., Wu, Y. and Pei, H. 2022. Effects of pulsation ratio on center temperature and drying characteristics of pineapple slices with pulsed vacuum drying. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering** 15(6): 242-253.
- Kusuma, H.S., Sembiring, L.I. and Aisahasnati, S. 2023. Microwave-assisted drying of *Cymbopogon nardus* leaves: Kinetics,

- moisture diffusivity, energy, and emission study. **Journal of Stored Products Research** 102: 102130.
- Liu, Z.L., Xie, L., Zielinska, M., Pan, Z., Wang, J., Deng, L.Z., Wang, H. and Xiao, H.W. 2021. Pulsed vacuum drying enhances drying of blueberry by altering micro-, ultrastructure and water status and distribution. **LWT** 142: 111013.
- Manangan, W. and Witanantakit, K. 2020. Water lily drying using pulsed vacuum-infrared combined with silica sand embedding. **Kasem Bundit Engineering Journal** 10(3): 84-97. (in Thai)
- Mohamed Hanaa, A.R., Sallam, Y.I., El-Leithy, A.S. and Aly, S.E. 2012. Lemongrass (*Cymbopogon citratus*) essential oil as affected by drying methods. **Annals of Agricultural Sciences** 57(2): 113-116.
- Pei, Y.P., Vidyarthi, S.K., Wang, J., Deng, L.Z., Wang, H., Li, G.F., Zheng, Z.A., Wu, M. and Xiao, H.W. 2021. Effect of vacuum-steam pulsed blanching (VSPB) on drying characteristics and quality properties of garlic slices. **Drying Technology** 40(6): 1232-1246.
- Saengsuwan, T. 2021. Heat pump oven for drying chrysanthemum flower. **Journal of Energy and Environment Technology** 8(1): 32-41. (in Thai)
- Setareh, R., Mohammadi-Ghermezgoli, K., Ghaffari-Setoubadi, H. and Alizadeh-Salteh, S. 2023. The effectiveness of hot-air, infrared and hybrid drying techniques for lemongrass: appearance acceptability, essential oil yield, and volatile compound preservation. **Scientific Reports** 13(1): 18820.
- Srivichai, G. 2016. A study of performance of the induction heating dryer. **The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok** 26(3): 375-383. (in Thai)
- Syafitri, D.M., Levita, J., Mutakin, M. and Diantini, A. 2018. A review: is ginger (*Zingiber officinale* var. *roscoe*) potential for future phytomedicine? **Indonesian Journal of Applied Sciences** 8(1): 1-6.
- Thamkaew, G., Sjöholm, I. and Galindo, F.G. 2021. A review of drying methods for improving the quality of dried herbs. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition** 61(11): 1763-1786.
- Tirawanichakul, S., Tasara, J., Parnma, C., Numcha, R. and Tirawanichakul, Y. 2011. Effect of drying condition on kinetic and quality of jackfruit drying. **Thaksin University Journal** 14(3): 83-91. (in Thai)
- Tirawanichakul, S., Tasara, J., Suriyoung, J., Pankamnerd, P. and Tirawanichakul, Y. 2013. Drying pandan and lemongrass leaves to produce herbal tea using various heat sources, pp. 570-577. *In The 14th TSAE National Conference and the 6th TSAE International Conference*. Huahin Grand Hotel and Plaza, Prachuap Khiri Khan. (in Thai)
- Wang, J., Law, C.L., Nema, P.K., Zhao, J.H., Liu, Z.L., Deng, L.Z., Gao, Z.J. and Xiao, H.W. 2018. Pulsed vacuum drying enhances

drying kinetics and quality of lemon slices.

Journal of Food Engineering 224: 129-138.

Xie, L., Mujumdar, A.S., Fang, X.M., Wang, J., Dai, J.W., Du, Z.L., Xiao, H.W., Liu, Y. and Gao, Z.J. 2017a. Far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR-PVD) of wolfberry (*Lycium barbarum* L.): Effects on drying kinetics and quality attributes. **Food and Bioprocess Processing** 102: 320-331.

Xie, Y., Gao, Z., Liu, Y. and Xiao, H. 2017b. Pulsed vacuum drying of rhizoma dioscoreae slices. **LWT** 80: 237-249.

Zhang, W.P., Chen, C., Pan, Z., Xiao, H.W., Xie, L., Gao, Z.J. and Zheng, Z.A. 2020. Design and performance evaluation of a pilot-scale pulsed vacuum infrared drying (PVID) system for drying of berries. **Drying Technology** 38(10): 1340-1355.

Zhou, Y.H., Pei, Y.P., Sutar, P.P., Liu, D.H., Deng, L.Z., Duan, X., Liu, Z.L. and Xiao, H.W. 2022. Pulsed vacuum drying of banana: Effects of ripeness on drying kinetics and physicochemical properties and related mechanism. **LWT** 161: 113362.