

การออกแบบ สร้าง และทดสอบระบบอบแห้งแบบผสมผสาน
 กรณีศึกษา การผลิตเห็ดหูหนูดำอบแห้งของเกษตรกร
 อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่
 DESIGN CONSTRUCTION AND TEST OF A HYBRID DRYING SYSTEM:
 A CASE STUDY OF DRIED BLACK WOOD EAR
 MUSHROOMS PRODUCTION BY FARMERS IN SAN SAI DISTRICT
 CHIANG MAI PROVINCE

วันที่รับ: 10 มีนาคม 2565

วันที่แก้ไข: 26 เมษายน 2565

วันที่ตอบรับ: 6 พฤษภาคม 2565

พิบูลย์ สีคำ¹, ปริญ คงกระพันธ์^{1*} และ หยาตผน ทนงการกิจ²

Phibun Seekham¹, Parin Khongkrapan^{1*}

and Yardfon Tanongkankit²

¹วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ 50290

¹School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290

²คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ 50290

²Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University, Chiang Mai 50290

*Corresponding author e-mail: parin.khongkrapan@gmail.com



บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอระบบอบแห้งแบบผสมผสานต้นแบบที่ถูกออกแบบและสร้างเพื่อให้สามารถลดระยะเวลาและลดการใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้ง โดยกำหนดเงื่อนไขในการออกแบบระบบอบแห้งต้นแบบ ดังนี้ 1) ห้องอบแห้งมีความจุ 2 ลูกบาศก์เมตร 2) น้ำหนักและความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ 50 กิโลกรัม และร้อยละ 99 ฐานเปียก ตามลำดับ 3) ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้งร้อยละ 5 ฐานเปียก 4) อุณหภูมิลมร้อน ณ ทางเข้าและทางออกห้องอบแห้งมีค่า 80 และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ 5) ความเร็วลมที่ใช้ในการอบแห้งสูงสุด 5 เมตรต่อวินาที 6) อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม 25 องศาเซลเซียส และร้อยละ 60 ตามลำดับ 7) ระยะเวลาในการอบแห้ง 12 ชั่วโมง และ 8) ค่าความปลอดภัยในการออกแบบร้อยละ 20 จากการคำนวณเพื่อการออกแบบเชิงวิศวกรรม พบว่าระบบต้นแบบมีภาระทางความร้อนในการระเหยน้ำออกจากวัตถุดิบรวมค่าความปลอดภัยในการออกแบบแล้วประมาณ 25 กิโลวัตต์ ผู้วิจัยจึงเลือกติดตั้ง

แหล่งความร้อน 3 ชนิด ให้ทำงานผสมผสานกัน ได้แก่ ป้อนความร้อน ฮีตเตอร์ไฟฟ้า และอินฟราเรด มีกำลังการผลิตความร้อนรวมประมาณ 29 กิโลวัตต์ จากการทดลองอบแห้งเห็ดหูหนูดำ พบว่าระบบต้นแบบมีประสิทธิภาพสูงสุดประมาณร้อยละ 81 เมื่อใช้ลมร้อนผสมผสานเทคนิคอบแห้งแบบอินฟราเรด ซึ่งสูงกว่าการใช้ลมร้อนร้อยละ 6.69 เทคนิคการอบแห้งแบบผสมผสานใช้ระยะเวลาและพลังงานในการอบแห้งน้อยกว่าการใช้ลมร้อนเพียงประมาณร้อยละ 28 และ 6 ตามลำดับ โดยไม่กระทบต่อลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์เห็ดหูหนูดำอบแห้ง

คำสำคัญ: การอบแห้ง, ระบบผสมผสาน, ป้อนความร้อน, อินฟราเรด, การประหยัดพลังงาน



Abstract

This research paper aimed to present a prototype hybrid drying system that was designed and constructed in order to reduce the time and energy consumption of the drying process. The following conditions were specified in the design of the prototype drying system: 1) the volume of the drying chamber was 2 m^3 , 2) the mass and moisture content of the raw material were 50 kg and 99.9% wb, respectively, 3) the moisture content of the dehydrated product was 5% wb, 4) the temperatures of hot air at the drying chamber's inlet and outlet were 80 and 70°C , respectively, 5) the maximum hot air velocity was 5 m/s, 6) the ambient air temperature and relative humidity were 25°C and 60%, respectively, 7) the drying time was 12 hours, and 8) the design safety factor was 20%. According to the engineering design calculation, the prototype system had a thermal load of evaporating water from the raw material, with a total design safety factor of approximately 25 kW. As a result, the researchers decided to combine three different types of heat sources: a heat pump, electric heaters, and infrared heaters. The combined heating capacity of those devices is approximately 29 kW. The results of wood ear mushroom drying experiments showed that a prototype drying system provided a maximum efficiency of about 81% with the hybrid of hot air and infrared drying techniques, which was greater than using only hot air as a heat source by 6.69%. This hybrid drying

technique required roughly 28% less drying time and 6% less energy than hot air drying, without compromising the appearance of dried wood ear mushrooms.

Keywords: Drying, Hybrid System, Heat Pump, Infrared, Energy Saving



บทนำ

ปัจจุบันมีผลผลิตทางการเกษตรกลุ่มที่มีความต้องการจากตลาดต่างประเทศหลายชนิด แต่วัตถุดิบมีความชื้นสูงทำให้ยากต่อการเก็บรักษาในรูปแบบของสดเนื่องจากเกิดเชื้อรา และเกิดความเสียหายจากการขนส่งระยะไกลได้ง่าย เช่น เห็ด สมุนไพร ผลไม้ เป็นต้น ดังนั้นการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่สามารถถนอมและยืดอายุการเก็บรักษาได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้าเกษตรที่มีจำนวนมากของประเทศไทยอีกด้วย และปัจจุบันตลาดโลกมีแนวโน้มความต้องการสินค้าเกษตรที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ประเทศไทยตั้งเป้าหมายในการส่งออกสินค้าประเภทผัก ผลไม้ และผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปไว้มากกว่าสองพันล้านเหรียญสหรัฐ ซึ่งเป็นการขยายตัวประมาณร้อยละ 3 ของมูลค่าการส่งออกสินค้าทั้งหมด (สำนักงานนโยบายและยุทธศาสตร์การค้า กระทรวงพาณิชย์, 2562) โดยผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งเป็นสินค้าที่ได้รับการส่งเสริมให้ส่งออกเพื่อจำหน่ายทั่วโลกเป็นอันดับต้น ๆ ในหมวดสินค้าเกษตรของประเทศไทย จากความต้องการผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งที่เพิ่มขึ้นของตลาดโลก ส่งผลให้ผู้ประกอบการต้องเพิ่มกำลังการผลิตเพื่อตอบสนองตลาดและต้องลดต้นทุนการผลิตเพื่อเพิ่มโอกาสในการแข่งขัน แต่เนื่องด้วยความชื้นเริ่มต้นที่สูงของวัตถุดิบทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการอบแห้งยาวนาน จึงเกิดความสิ้นเปลืองพลังงานโดยเฉพาะในขั้นตอนการผลิตอากาศร้อนหรือลมร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัสดุอบ (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2562) ส่งผลให้ระบบอบแห้งทั่วไปในประเทศไทยที่ใช้แหล่งความร้อนจากเชื้อเพลิงฟอสซิลกลุ่มก๊าซหุงต้ม (LPG) ที่มีราคาสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องมีต้นทุนด้านพลังงานที่สูงขึ้นตามไปด้วย อีกทั้งยังก่อให้เกิดปัญหาด้านมลพิษจากการสันดาปซึ่งนำไปสู่ปัญหาโลกร้อน ทั้งนี้ตลาดผลิตภัณฑ์แปรรูปอบแห้งยุคใหม่ไม่ได้มีความต้องการในเชิงปริมาณด้านเดียว แต่ผู้บริโภคกลับเลือกพิจารณาในด้านคุณภาพ สี สัน และคุณค่าทางอาหารของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ด้วย ทำให้ผู้ประกอบการในประเทศไทยจำต้องปรับตัวและพัฒนาระบบอบแห้งเดิมให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น สามารถประหยัดพลังงานเพื่อลดต้นทุนและต้องคงสี สันรวมถึงคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ไว้ให้ได้มากที่สุด ดังนั้น

การพัฒนาระบบให้ความร้อนในการอบแห้งจึงเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งให้สูงขึ้นได้ (Charoenvai et al., 2013) โดยแหล่งความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงและถือเป็นเทคโนโลยีประหยัดพลังงานที่เหมาะสมกับการติดตั้งในระบบอบแห้งในปัจจุบัน คือ เทคโนโลยีปั๊มความร้อน (Heat Pump) ซึ่งประสิทธิภาพเชิงความร้อนของอุปกรณ์ดังกล่าวพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ซึ่งในปัจจุบันอุปกรณ์นี้ได้รับการพัฒนาจนมีค่าสัมประสิทธิ์ตั้งแต่ 3 ขึ้นไป กล่าวคือ เมื่อป้อนพลังงานไฟฟ้าให้กับปั๊มความร้อน 1 หน่วย ปั๊มความร้อนนั้นจะสามารถสร้างความร้อนได้ถึง 3 หน่วย ทั้งนี้พลังงานความร้อน 2 หน่วยที่เพิ่มขึ้น เกิดจากการดึงความร้อนจากอากาศภายนอกโดยสารทำความเย็นที่ใช้ในระบบ ดังนั้นปั๊มความร้อนจึงเป็นแหล่งพลังงานที่สามารถทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อการผลิตความร้อนที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตาม ปั๊มความร้อนยังมีข้อจำกัดด้านการผลิตความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส เนื่องจากความดันของสารทำงานที่สูงเกินไปจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ ดังนั้นจึงต้องเสริมสมรรถนะการผลิตความร้อนฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพื่อช่วยเพิ่มอุณหภูมิให้กับลมร้อนหากมีความจำเป็นต้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอุณหภูมิความร้อนสูงกว่าข้อจำกัดดังกล่าว ถึงแม้ว่าการใช้ปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงในการผลิตความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง แต่การอบแห้งด้วยลมร้อนนั้นเป็นการให้ความร้อนแก่วัสดุอบทางอ้อม กล่าวคือ เริ่มต้นพลังงานจะถูกใช้ในการทำให้อากาศร้อน จากนั้นความร้อนจากอากาศจะถ่ายเทให้กับวัสดุอบเพื่อทำให้น้ำเกิดการระเหย ซึ่งการให้ความร้อนทางอ้อมแก่วัตถุนี้ มีข้อเสียหลายประการ เช่น ใช้เวลาในการอบแห้งนาน ซึ่งจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้มีสีคล้ำ มีลักษณะเนื้อสัมผัสไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค และคุณค่าทางอาหารลดลงมาก (Ratti & Mujumdar, 2006) จากข้อจำกัดของการอบแห้งแบบลมร้อนดังกล่าว ทำให้ผู้วิจัยศึกษาหาแนวทางในการลดระยะเวลาในการอบแห้งและพบว่ามีการใช้เทคโนโลยีอินฟราเรดซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่มีจุดเด่นด้านการถ่ายเทความร้อนตรงสู่ผิวของวัสดุโดยไม่อาศัยตัวกลางในกระบวนการอบแห้งวัสดุชนิดต่าง ๆ โดยเทคโนโลยีนี้ให้อัตราการระเหยของความชื้นออกจากวัสดุอบสูงกว่าการใช้ลมร้อน จึงสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้อย่างมีนัยสำคัญ (Nowak & Lewicki, 2005) และเนื่องจากระยะเวลาในการอบแห้งที่ลดลงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ระหว่างวัสดุอบกับอากาศลดลงด้วย ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ดีขึ้นในด้านของสีสัมผัสและผิวสัมผัส (Sakare et al., 2020) อีกทั้งการอบแห้งที่ใช้เวลาน้อยลงยังส่งผลต่อการใช้พลังงานโดยรวมของกระบวนการอบแห้งที่ลดลงด้วย จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงทำการออกแบบ สร้าง และทดสอบระบบอบแห้งแบบผสมผสานต้นแบบที่บูรณาการเทคโนโลยีการให้ความร้อนแบบประหยัดพลังงานด้วยระบบปั๊มความร้อนและเทคโนโลยีการให้ความร้อน

แบบรวดเร็วด้วยรังสีอินฟราเรด เพื่อให้ได้เครื่องมือที่สามารถสนองตอบความต้องการที่จะลดระยะเวลาและลดการใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งนำไปสู่การลดต้นทุนในการผลิต ทั้งนี้เมื่อทำการออกแบบและสร้างแล้วเสร็จ ผู้วิจัยจะทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบอบแห้งต้นแบบด้วยการทดลองอบแห้งเห็ดหูหนูดำซึ่งเป็นตัวแทนของผลิตผลทางการเกษตรที่มีความชื้นสูง (ประมาณร้อยละ 90 ฐานเปียก) จึงสามารถใช้เป็นตัวแทนของผลิตผลทางการเกษตรที่ต้องการแปรรูปด้วยวิธีอบแห้งได้ค่อนข้างครอบคลุม ทั้งนี้เมื่อทราบถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญต่อกระบวนการอบแห้ง คณะผู้วิจัยจะทำการปรับปรุงและพัฒนาเป็นต้นแบบเทคโนโลยีที่จะถ่ายทอดให้กับวิสาหกิจชุมชนหรือผู้ประกอบการแปรรูปผลิตภัณฑ์อบแห้งได้นำไปใช้ในการพัฒนาธุรกิจเพื่อเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันต่อไป



วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อออกแบบ สร้าง และทดสอบระบบอบแห้งแบบผสมผสานต้นแบบที่สามารถลดระยะเวลาและลดการใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้ง



วิธีดำเนินการวิจัย

การออกแบบระบบอบแห้ง

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยในเชิงวิศวกรรมเครื่องกลและพลังงาน โดยผู้วิจัยได้ทำการออกแบบ สร้าง และทดสอบระบบอบแห้งแบบผสมผสาน และสร้างแบบจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อทดสอบสมมติฐานในการออกแบบก่อนการสร้าง เพื่อให้ได้เครื่องจักรที่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยประหยัดพลังงาน และลดระยะเวลาการอบแห้ง โดยขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การตั้งสมมติฐานและการกำหนดเงื่อนไขในการออกแบบ

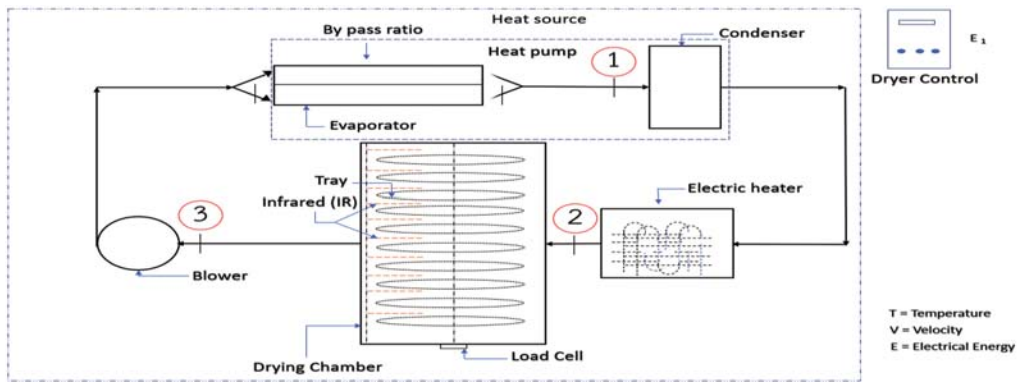
การออกแบบระบบอบแห้งในงานวิจัยนี้ได้ตั้งสมมติฐานในการออกแบบให้ระบบอบแห้งเป็นชนิดที่ใช้พลังงานมากที่สุด กล่าวคือ ผู้วิจัยกำหนดระบบอบแห้งนี้ระบายอากาศชั้นออกจากห้องอบแห้งทั้งหมดแล้วเติมอากาศแห้งจากภายนอกผ่านแหล่งความร้อนเพื่อเข้าไประเหยน้ำจากวัตถุดิบต่อไป ทำให้ระบบชนิดนี้ต้องการพลังงานในการอุ่นอากาศสูง และส่งผลให้เป็นระบบอบแห้งชนิดที่สิ้นเปลืองพลังงานสูงที่สุดด้วย เหตุที่ผู้วิจัยตั้งสมมติฐานดังกล่าวเนื่องจากการทราบถึงภาระทางความร้อนสูงสุดที่จะเกิดขึ้นได้เพื่อกำหนดขนาดของแหล่งความร้อนให้มีพิกัดการสร้างความร้อนสูงสุดเท่าที่จะติดตั้งกับเครื่องต้นแบบได้ จากสมมติฐานดังกล่าวนี้จะทำให้ได้แหล่งความร้อนและระบบหมุนเวียนอากาศที่มีขนาดเพียงพอต่อการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรชนิดต่าง ๆ ได้ครอบคลุมมากที่สุด ทั้งนี้เงื่อนไขที่ต้องกำหนดเพื่อการ

ออกแบบ ได้แก่ 1) ห้องอบแห้งมีความจุเท่ากับ 2 ลูกบาศก์เมตร 2) น้ำหนักและความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบเท่ากับ 50 กิโลกรัม และร้อยละ 99 ฐานเปียก ตามลำดับ 3) ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้งเท่ากับร้อยละ 5 ฐานเปียก 4) อุณหภูมิลมร้อน ณ ทางเข้าและทางออกห้องอบแห้งมีค่าเท่ากับ 80 และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ 5) ความเร็วลมที่ใช้ในการอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 5 เมตรต่อวินาที 6) อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส และร้อยละ 60 ตามลำดับ 7) ระยะเวลาในการอบแห้งเท่ากับ 12 ชั่วโมง และ 8) ค่าความปลอดภัยในการออกแบบ (Factor of Safety) เท่ากับร้อยละ 20

ขั้นตอนที่ 2 รวบรวมข้อมูลสมบัติของอากาศ ณ จุดต่าง ๆ ของระบบอบแห้ง ดังภาพ 1 สมบัติอากาศขึ้นจุดที่ 1 อากาศแวดล้อม ณ จุดนี้จะทำการกำหนดอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ $T_{db,1}$ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม RH_1 ตามเงื่อนไขในการออกแบบ ลงบนแผนภูมิอากาศชื้น (Psychrometric Chart) แล้วอ่านค่าเอนทัลปี (Enthalpy) h_1 และค่าอัตราส่วนความชื้น w_1 (Brooker, 1992)

สมบัติอากาศขึ้นจุดที่ 2 อุณหภูมิอากาศร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้ง (อากาศแวดล้อมที่ผ่านการให้ความร้อนแล้ว) ณ จุดนี้จะทำการกำหนดอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ $T_{db,2}$ ตามเงื่อนไขในการออกแบบ และกำหนดให้ค่าอัตราส่วนความชื้น w_2 ของอากาศ ณ ตำแหน่งนี้ให้มีค่าคงที่เท่ากับค่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศแวดล้อม w_1 ($w_2 = w_1$ เนื่องจากอากาศที่ผ่านแหล่งความร้อนไม่มีปริมาณน้ำในอากาศเพิ่มขึ้น) ลงบนแผนภูมิอากาศชื้น แล้วอ่านค่าเอนทัลปี h_2 และค่าปริมาตรจำเพาะ v_2 (Brooker, 1992)

สมบัติอากาศขึ้นจุดที่ 3 อากาศร้อนที่ออกจากห้องอบแห้ง เนื่องจากกระบวนการอบแห้งเป็นกระบวนการดึงความชื้นออกจากวัสดุทำให้อากาศมีความชื้นเพิ่มขึ้น และเป็นกระบวนการอะเดียแบติก (Adiabatic) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงสมบัติของอากาศขึ้นระหว่างจุด 2 ไป 3 จึงเป็นกระบวนการแบบเอนทัลปีคงที่ ($h_3 = h_2$) ณ จุดนี้จะทำการกำหนดอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ $T_{db,3}$ ตามเงื่อนไขในการออกแบบ และกำหนดค่าเอนทัลปีของอากาศร้อนที่ออกจากห้องอบแห้งเท่ากับเอนทัลปีของอากาศร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้งลงบนแผนภูมิอากาศชื้น แล้วอ่านค่าอัตราส่วนความชื้น w_3 (Brooker, 1992)



ภาพ 1 ตำแหน่งในการรวบรวมข้อมูลสมบัติของอากาศ

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณน้ำหนักสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้ง (W_f) โดยกำหนดน้ำหนักเริ่มต้นของวัตถุดิบ (W_i) ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (M_i) และความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้ง (M_f) ตามเงื่อนไขการออกแบบที่กำหนด แล้วทำการคำนวณน้ำหนักสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้งด้วยสมการที่ (1) (ณัฐวุฒิ ดุษฎี, 2559)

$$W_f = \frac{W_i (100 - M_i)}{(100 - M_f)} \quad (1)$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณปริมาณน้ำที่ต้องระเหยออกจากวัตถุดิบ (m_w) ด้วยค่าน้ำหนักเริ่มต้นของวัตถุดิบ (W_i) ตามเงื่อนไขการออกแบบและน้ำหนักสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้ง (W_f) จากขั้นตอนที่ 3 ด้วยสมการที่ (2) (ณัฐวุฒิ ดุษฎี, 2559)

$$m_w = W_i - W_f \quad (2)$$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณอัตราการระเหยน้ำระหว่างการอบแห้ง ($\dot{m}_w$) จากปริมาณน้ำที่ต้องระเหยออกจากวัตถุดิบ (m_w) จากขั้นตอนที่ 4 และระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (t) ตามเงื่อนไขการออกแบบด้วยสมการที่ (3) (ณัฐวุฒิ ดุษฎี, 2559)

$$\dot{m}_w = \frac{m_w}{t} \quad (3)$$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ($\dot{m}_a$) ที่ต้องใช้ในการอบแห้งด้วยค่าอัตราการระเหยน้ำระหว่างการอบแห้ง ($\dot{m}_w$) จากขั้นตอนที่ 5 และผลต่างของอัตราส่วนความชื้นของอากาศเข้าและออกจากห้องอบแห้ง (w_2 และ w_3 จากขั้นตอนที่ 2) ด้วยสมการที่ (4) (ณัฐวุฒิ ดุษฎี, 2559)

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_w}{w_f - w_i} = \frac{\dot{m}_w}{w_3 - w_2} \quad (4)$$

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ ($\dot{V}_a$) ที่ต้องใช้ในการอบแห้งด้วยค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ($\dot{m}_a$) จากขั้นตอนที่ 6 และค่าปริมาตรจำเพาะของอากาศเข้าห้องอบแห้ง (v_2 จากขั้นตอนที่ 2) ด้วยสมการที่ (5) (ณัฐวุฒิ ดุษฎี, 2559)

$$\dot{V}_a = \dot{m}_a \cdot v_i = \dot{m}_a \cdot v_2 \quad (5)$$

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณพลังงานความร้อนที่ระบบอบแห้งต้องการ (Q_{dryer}) ในขั้นตอนนี้จะทำการคำนวณค่าพลังงานที่ต้องใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศแวดล้อมให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเท่ากับอุณหภูมิลมร้อนที่ต้องการใช้ในการอบแห้งตามเงื่อนไขในการออกแบบ โดยการคำนวณจะพิจารณาจากความสัมพันธ์ของอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ($\dot{m}_a$) ที่ต้องใช้ในการอบแห้งจากขั้นตอนที่ 6 และผลต่างเอนทาลปีของอากาศแวดล้อมก่อนเข้าและออกจากแหล่งความร้อน (h_1 และ h_2 จากขั้นตอนที่ 2) ด้วยสมการที่ (6) (ณัฐวุฒิ ดุษฎี, 2559)

$$Q_{\text{dryer}} = \dot{m}_a \times \frac{(h_2 - h_1)}{3,600} \quad (6)$$

ขั้นตอนที่ 9 กำหนดค่าความปลอดภัยเชิงวิศวกรรม (Safety Factor: SF) เพื่อให้แหล่งความร้อนที่จะติดตั้งให้กับระบบอบแห้งไม่ทำงานหนักจนเกินไปหรือเกิดการเสียหายโดยค่าพลังงานงานความร้อนออกแบบ (Q_{design}) สามารถคำนวณได้จากค่าพลังงานงานความร้อนที่ระบบอบแห้งต้องการ (Q_{dryer}) จากการคำนวณในขั้นตอนที่ 8 และค่าความปลอดภัย (Safety Factor: SF) ดังสมการที่ (7) (Ratti and Mujumdar, 2006)

$$Q_{\text{design}} = Q_{\text{dryer}} \times (SF) \quad (7)$$

การทดสอบสมรรถนะระบบอบแห้ง

งานวิจัยนี้จะทำการทดสอบสมรรถนะระบบอบแห้งโดยการทดลองอบแห้งเห็ดหูหนูดำที่เก็บเกี่ยวจากฟาร์มของเกษตรกรในอำเภอสนทราย จังหวัดเชียงใหม่ เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่มีความชื้นเริ่มต้นค่อนข้างสูง (ประมาณร้อยละ 90 ฐานเปียก) และมีอายุกับจัดเก็บแบบสดต่ำจึงเหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนของผลิตผลทางการเกษตรสำหรับทดลองแปรรูปเป็นอาหารอบแห้งด้วยระบบอบแห้งต้นแบบนี้ ซึ่งในการทดลองผู้วิจัยจะทำการสุ่มตัวอย่างเห็ดหูหนูดำสดเพื่อวัดค่าความชื้นเริ่มต้นด้วยเครื่อง Moisture Analyzer ยี่ห้อ Ohaus รุ่น MB25 จากนั้นจะทำการบรรจุเห็ดหูหนูดำในถาดอบภายในเครื่องอบแห้งถาดละ 5 กิโลกรัม จำนวน 10 ถาด แล้วทำการทดลองด้วยเทคนิคการอบแห้ง 2 แบบ ได้แก่ 1) เทคนิคอบแห้งด้วยลมร้อน (Hot Air: HA) และ 2) เทคนิคอบแห้งด้วยลมร้อนผสมผสานอินฟราเรด (HA + IR) กำลังไฟฟ้า 400 วัตต์ (ทั้งนี้สาเหตุที่ผู้วิจัยกำหนดเทคนิคการอบแห้งด้วยอินฟราเรดเป็นกำลังไฟฟ้าแทนที่จะกำหนดเป็นอุณหภูมิ เนื่องจากวัตถุดิบถูกจัดวางในถาดอบแห้งที่หมุนตลอดเวลาทำให้วัตถุดิบดังกล่าวได้รับความร้อนจากหลอดอินฟราเรดซึ่งติดตั้งไว้เหนือถาดอบแห้งเพียงชั่วขณะ จึงไม่สามารถวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุดิบขณะเคลื่อนที่ผ่านรังสีอินฟราเรดได้) โดยทั้งสองเทคนิคจะกำหนดให้ถาดอบแห้งหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ 5 รอบต่อนาที อุณหภูมิและความเร็วลมร้อนคงที่เท่ากับ 65 องศาเซลเซียส และ 1.5 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ระหว่างการทดลองจะทำการเก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์อบแห้งทุก ๆ 10 นาที เพื่อนำมาวิเคราะห์ค่าความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้น (ยี่ห้อ Ohaus รุ่น MB25) ทั้งนี้เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช.136/2558 ซึ่งกำหนดให้ผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้แห้งต้องมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 12 ฐานเปียก (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2558) ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องทำการอบแห้งเห็ดหูหนูดำจนกว่าค่าความชื้นสุดท้ายจะต่ำกว่าร้อยละ 10 ฐานเปียก เนื่องจากผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งทุกชนิดจะดูดความชื้นกลับจากอากาศแวดล้อมทั้งก่อนและระหว่างการบรรจุ ทำให้การผลิตสินค้าอบแห้งจำเป็นต้องเผื่อค่าความชื้นสุดท้ายให้ต่ำกว่าค่าที่ระบุในมาตรฐานเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะของระบบอบแห้งที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ได้แก่

1. อัตราการอบแห้ง เป็นค่าที่แสดงถึงอัตราส่วนของปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อระยะเวลาในการอบแห้ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (8) (Tonui et al., 2014)
2. อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ เป็นค่าที่แสดงถึงอัตราส่วนของปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (9) (Sarkar et al., 2006)

3. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เป็นค่าที่แสดงถึงพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำที่ระเหย ซึ่งเป็นค่าส่วนกลับของ SMER สามารถคำนวณจากสมการที่ (10) (Charoenvai et al., 2013)

4. ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบอบแห้ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (11) (Dincer et al., 2003)

$$DR = \frac{w_i - w_f}{t} \quad (8)$$

$$SMER = \frac{w_i - w_f}{P_E} \quad (9)$$

$$SEC = \frac{3.6P_E}{w_i - w_f} \quad (10)$$

$$\eta_{system} = \frac{m_w h_{fg}}{E_{total}} \times 100 \quad (11)$$

เมื่อ DR	คือ	อัตราการอบแห้ง (กิโลกรัมน้ำต่อชั่วโมง)
SMER	คือ	อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง)
SEC	คือ	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัมน้ำ)
η_{system}	คือ	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (ร้อยละ)
w_i	คือ	น้ำหนักเริ่มต้นของวัตถุดิบ (กิโลกรัม)
w_f	คือ	น้ำหนักสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้ง (กิโลกรัม)
t	คือ	ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (ชั่วโมง)
P_E	คือ	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (กิโลวัตต์ชั่วโมง)
m_w	คือ	มวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัตถุดิบ (กิโลกรัม)
h_{fg}	คือ	ความร้อนแฝงของน้ำ (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)
E_{Total}	คือ	พลังงานไฟฟ้ารวมที่ป้อนให้กับระบบ (กิโลจูล)

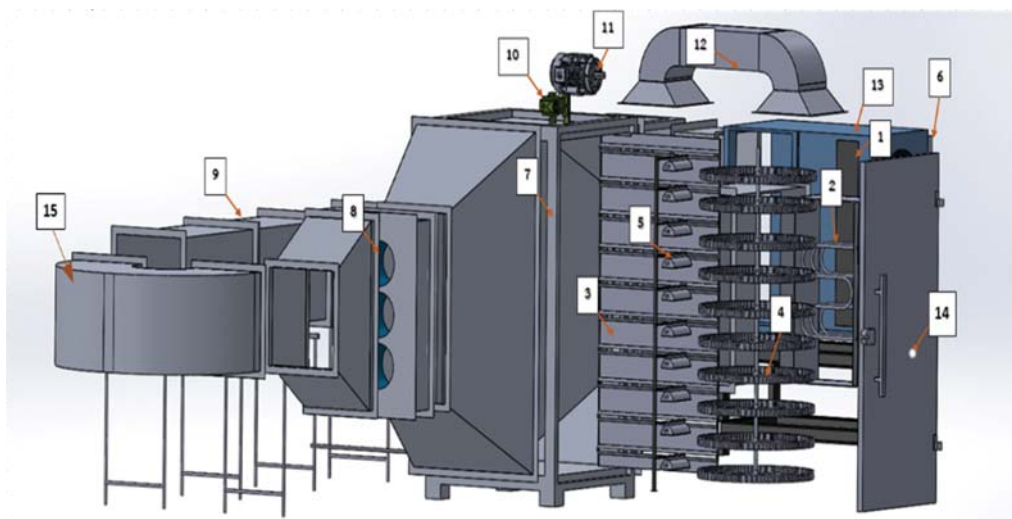


ผลการวิจัย

ผลการออกแบบและสร้างระบบอบแห้ง

จากผลการคำนวณตามเงื่อนไขการออกแบบข้างต้น พบว่าระบบอบแห้งต้องการแหล่งความร้อนในการระเหยน้ำออกจากวัตถุดิบสูงสุดเท่ากับ 20.50 กิโลวัตต์ โดยเมื่อเผื่อค่าความปลอดภัยร้อยละ 20 จากพิกัดที่คำนวณได้จะทำให้ระบบอบแห้งต้องการแหล่งความร้อนที่ขนาดไม่ต่ำกว่า 24.60 กิโลวัตต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้แหล่งความร้อน

ที่มีพิกัดกำลังการผลิตความร้อนรวมไม่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการออกแบบ โดยบูรณาการระบบ
ปั๊มความร้อนขนาด 10.50 กิโลวัตต์ เข้ากับฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 14.40 กิโลวัตต์ ซึ่งคิดเป็นกำลัง
การผลิตความร้อนรวมเท่ากับ 24.90 กิโลวัตต์ และเสริมสมรรถนะการให้ความร้อนแก่วัตถุ
ด้วยรังสีอินฟราเรด (IR) โดยทำการติดตั้งหลอดอินฟราเรดแบบใช้ไฟฟ้าพร้อมคอมสัทอนรังสี
ที่สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าได้ในช่วง 0 ถึง 500 วัตต์ จำนวน 10 หลอด บริเวณเหนือ
ถาดอบแห้งแต่ละถาด เมื่อคำนวณจากประสิทธิภาพของหลอดอินฟราเรดประมาณร้อยละ 80
จะสามารถคิดเป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากหลอดอินฟราเรดชุดนี้ประมาณ 4 กิโลวัตต์
ทำให้ระบบอบแห้งแบบผสมผสานนี้มีพิกัดกำลังการผลิตความร้อนประมาณ 29 กิโลวัตต์
ทำให้ระบบนี้สามารถอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรได้ 2 เทคนิค ได้แก่ 1) เทคนิคการอบแห้ง
ด้วยลมร้อนที่สามารถปรับเปลี่ยนอุณหภูมิและความเร็วลมได้สูงสุด 120 องศาเซลเซียส
และ 5 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ และ 2) เทคนิคการอบแห้งด้วยลมร้อนผสมผสานอินฟราเรด
ที่สามารถสร้างอุณหภูมิที่ผิวผลิตภัณฑ์ได้สูงสุดมากกว่า 200 องศาเซลเซียส (กรณีถาดอบแห้ง
หยุดนิ่งและใช้กำลังอินฟราเรด 500 วัตต์) โดยระบบอบแห้งแบบผสมผสานแหล่งความร้อน
ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้มีส่วนประกอบหลักแสดงดังภาพ 2

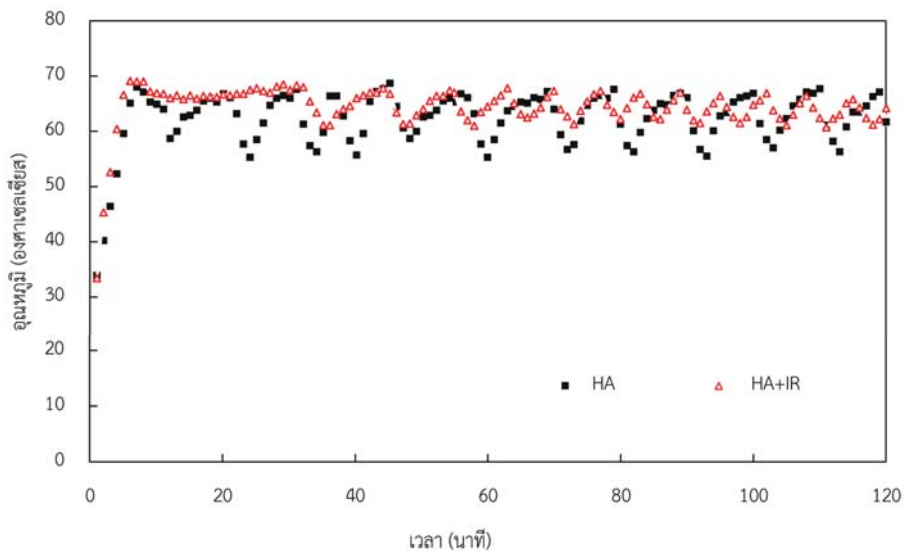


- | | | |
|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| 1) คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน | 2) ฮีตเตอร์ไฟฟ้า | 3) ช่องกระจายลมร้อน |
| 4) ถาดอบแห้งแบบหมุน | 5) หลอดอินฟราเรด | 6) ชุดควบคุม |
| 7) ห้องอบแห้ง | 8) พัดลม | 9) ท่อหมุนเวียนอากาศ |
| 10) ชุดเพื่องัดกำลัง | 11) มอเตอร์หมุนถาดอบแห้ง | 12) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน |
| 13) ปั๊มความร้อน | 14) ประตูห้องอบแห้ง | 15) ช่องระบายอากาศขึ้น |

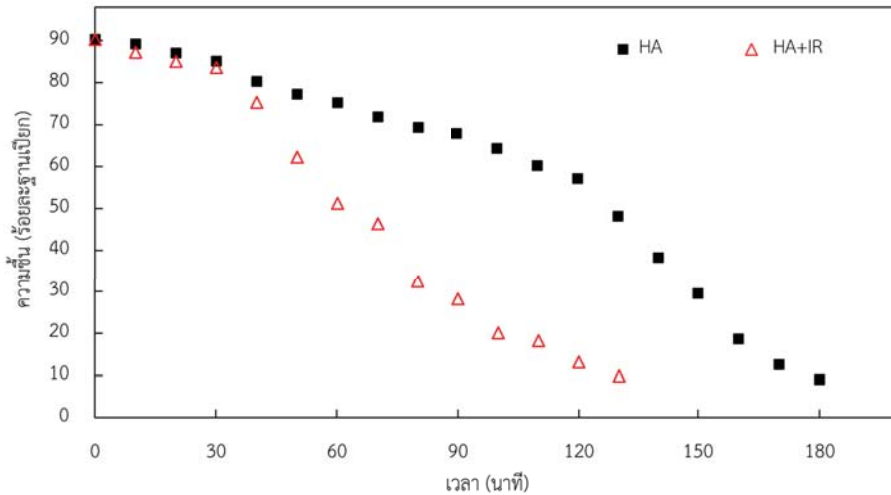
ภาพ 2 ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบอบแห้ง

ผลการทดสอบสมรรถนะระบบอบแห้ง

จากผลการทดลองอบแห้งเห็ดหูหนูดำตัวอย่างมีความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 90 ฐานเปียก ด้วยเทคนิคอบแห้งด้วยลมร้อน (HA) และเทคนิคอบแห้งด้วยลมร้อนผสมผสานอินฟราเรด (HA + IR) พบว่าทั้งสองเทคนิคสามารถผลิตเห็ดหูหนูดำอบแห้งที่มีความชื้นสุดท้ายต่ำกว่าร้อยละ 10 ฐานเปียก ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มพข.136/2558 โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากทั้งสองเทคนิคมีสีสัมผัสที่แตกต่างกัน แต่การใช้เทคนิคลมร้อนผสมผสานอินฟราเรด (HA + IR) จะทำให้ระบบอบแห้งเข้าสู่สมดุลทางอุณหภูมิได้เร็วและเสถียรกว่าเทคนิคลมร้อนเพียงอย่างเดียว (HA) (ภาพ 3) โดยเทคนิค HA + IR มีอัตราการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ (อัตราการอบแห้ง) เท่ากับ 20.63 กิโลกรัมน้ำต่อชั่วโมง ใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 130 นาที ในขณะที่การใช้เทคนิค HA มีอัตราการระเหยน้ำที่ต่ำกว่าทำให้ต้องใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่าถึง 50 นาที (ภาพ 4)



ภาพ 3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง



ภาพ 4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในผลิตภัณฑ์อบแห้ง

ผลจากการวัดค่าพารามิเตอร์ด้านพลังงาน พบว่าระบบอบแห้งแบบผสมผสาน แหล่งความร้อนในงานวิจัยนี้เมื่อใช้เทคนิค HA + IR และ HA มีประสิทธิภาพเชิงความร้อน สูงสุดประมาณร้อยละ 81 และ 76 ตามลำดับ จากค่าประสิทธิภาพที่สูงกว่าทำให้การใช้เทคนิค HA + IR ส่งผลต่อค่าสมรรถนะเชิงความร้อนด้านอื่น ๆ ที่ดีกว่าการใช้เทคนิค HA อีกด้วย กล่าวคือ เทคนิคลมร้อนผสมผสานอินฟราเรดสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในการอบแห้ง และลดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลงร้อยละ 6.18 และ 6.27 ตามลำดับ ในขณะที่ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะสูงขึ้นร้อยละ 6.69 โดยผลการทดสอบสมรรถนะของระบบอบแห้ง ในงานวิจัยนี้ แสดงดังตาราง 1

ตาราง 1 ผลการทดสอบสมรรถนะของระบบอบแห้ง (กรณีศึกษาเห็ดหูหนูดำ)

ค่าพารามิเตอร์	แหล่งความร้อน		การเปรียบเทียบ ลมร้อน + อินฟราเรด กับ ลมร้อน
	ลมร้อน	ลมร้อน + อินฟราเรด	
น้ำหนักเห็ดหูหนูดำ เริ่มต้น/สุดท้าย (กิโลกรัม)	50/5.35	50/5.31	ใกล้เคียงกัน
ความชื้นเห็ดหูหนู เริ่มต้น/สุดท้าย (ร้อยละฐานเปียก)	90.28/9.13	90.34/8.98	ใกล้เคียงกัน
ระยะเวลาในการอบแห้ง (นาทีก)	180	130	ลดลงร้อยละ 27.78

ค่าพารามิเตอร์	แหล่งความร้อน		การเปรียบเทียบ ลมร้อน + อินฟราเรด กับ ลมร้อน
	ลมร้อน	ลมร้อน + อินฟราเรด	
อัตราการระเหยน้ำ หรืออัตราการอบแห้ง (กิโลกรัมน้ำต่อชั่วโมง)	14.88	20.63	เพิ่มขึ้นร้อยละ 38.64
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (กิโลวัตต์ชั่วโมง)	38.82	36.42	ลดลงร้อยละ 6.18
อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) (กิโลจูลต่อกิโลกรัมน้ำ)	3,130	2,934	ลดลงร้อยละ 6.26
อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง)	1.15	1.23	เพิ่มขึ้นร้อยละ 6.96
ประสิทธิภาพของระบบอบแห้ง (ร้อยละ)	75.72	80.78	เพิ่มขึ้นร้อยละ 6.68



อภิปรายผลการวิจัย

การอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุอบแบบพาความร้อน (Heat Convection) โดยใช้อากาศเป็นตัวกลาง การถ่ายเทความร้อนลักษณะนี้อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุอบจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของลมร้อน จากภาพ 3 จะเห็นได้ว่าในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการอบแห้ง (20 นาทีแรก) ลมร้อนยังมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอบแห้งที่กำหนด (ต่ำกว่า 65 องศาเซลเซียส) ทำให้อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุอบมีอัตราการเพิ่มขึ้นต่ำ ส่งผลต่ออัตราการระเหยของความชื้นในช่วงต้นของกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนที่ต่ำตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีอบแห้ง ในขณะที่การให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบไม่อาศัยตัวกลางหรือที่เรียกว่าการแผ่รังสีความร้อน (Heat Radiation) กล่าวคือ รังสีอินฟราเรดจะพุ่งตรงสู่วัสดุอบทำให้อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้น้ำที่ผิวของผลิตภัณฑ์ระเหยออกตั้งแต่เริ่มกระบวนการอบแห้ง เมื่อพิจารณาผลการทดลองพบว่า การอบแห้งเห็ดหูหนูดำด้วยลมร้อนผสมผสานอินฟราเรด (HA + IR) ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวประมาณร้อยละ 28 ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนดังกล่าวข้างต้น ผลของระยะเวลาในการอบแห้งที่ลดลงทำให้อุปกรณ์ส่วนควบต่าง ๆ อาทิ พัดลมไฟฟ้า มอเตอร์หมุนถาดอบแห้ง ระบบเฝ้าตรวจวัดและควบคุมทำงานน้อยลง ส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมของระบบอบแห้งที่ลดลงตามไปด้วย จากเหตุผลดังกล่าวทำให้อัตราส่วนของพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำต่อพลังงานไฟฟ้ารวมที่ป้อนให้กับระบบอบแห้งมีค่าสูงขึ้น ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวคือค่าประสิทธิภาพ

ของระบบอบแห้งที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง อีกทั้งการที่ชิ้นส่วนต่าง ๆ ทำงานด้วยระยะเวลาที่สั้นลง จึงส่งผลต่อค่าซ่อมบำรุงซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของต้นทุนการผลิตมีค่าลดลงด้วย



สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการการออกแบบ สร้าง และทดสอบระบบอบแห้งแบบผสมผสานแหล่งความร้อนจากป้้มความร้อน ฮีตเตอร์ไฟฟ้า และหลอดอินฟราเรดไฟฟ้า ระบบนี้มีพิกัดกำลังการผลิตความร้อนรวมประมาณ 29 กิโลวัตต์ สามารถอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรได้ 2 เทคนิค ได้แก่ 1) เทคนิคการอบแห้งด้วยลมร้อนที่มีอุณหภูมิในช่วง 40 ถึง 120 องศาเซลเซียส ความเร็วลมร้อนในช่วง 0 ถึง 5 เมตรต่อวินาที และ 2) เทคนิคการอบแห้งด้วยลมร้อนผสมผสานอินฟราเรดที่กำลังอินฟราเรดในช่วง 0 ถึง 500 วัตต์ สามารถสร้างอุณหภูมิที่ผิวผลิตภัณฑ์ได้สูงสุดมากกว่า 200 องศาเซลเซียส จากการทดลองใช้ระบบดังกล่าวในการอบแห้งเห็ดหูหนูดำ พบว่าเทคนิคอบแห้งแบบผสมผสานสามารถผลิตเห็ดหูหนูดำอบแห้งที่มีความชื้นตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช.136/2558 และมีลักษณะทางกายภาพตรงต่อความต้องการของผู้บริโภค โดยระบบอบแห้งที่ออกแบบและสร้างขึ้นมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ 75.72 และ 80.78 เมื่ออบแห้งด้วยเทคนิคลมร้อนเพียงอย่างเดียวและอบแห้งเทคนิคลมร้อนผสมผสานอินฟราเรด ตามลำดับ ทั้งนี้การเสริมสมรรถนะของการอบแห้งแบบลมร้อนด้วยอินฟราเรดจะทำให้ระบบอบแห้งมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้นประมาณร้อยละ 7 ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลงประมาณร้อยละ 28 และสามารถลดต้นทุนทางด้านพลังงานลงประมาณร้อยละ 6 จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้นจึงสามารถสรุปได้ว่าระบบอบแห้งแบบผสมผสานในงานวิจัยนี้สามารถเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันให้กับผู้ประกอบการอบแห้งได้เป็นอย่างดีซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย โดยปัจจุบันคณะผู้วิจัยในนามวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ได้ใช้ประโยชน์เทคโนโลยีระบบอบแห้งแบบผสมผสานที่ออกแบบและสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ ในรูปแบบของการปรับปรุงผลิตผลทางการเกษตรของเกษตรกร วิสาหกิจชุมชน และผู้สนใจ เพื่อเป็นการถ่ายทอดเทคโนโลยีเพื่อบริการชุมชน และเพื่อการฝึกอบรมให้กับนักศึกษาของมหาวิทยาลัยแม่โจ้อย่างต่อเนื่องอีกด้วย

ข้อเสนอแนะการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งเห็ดหูหนูดำด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวมีค่าเท่ากับ 65 องศาเซลเซียส ที่ระดับความเร็วลมคงที่เท่ากับ 1.5 เมตรต่อวินาที เนื่องจากการอบด้วยอุณหภูมิที่สูงกว่านี้จะส่งผลต่อระยะเวลาในการอบแห้งที่ลดลงเพียงเล็กน้อย แต่กลับทำให้ระบบอบแห้งใช้พลังงานไฟฟ้าสูงขึ้นโดยใช้เหตุจึงไม่คุ้มค่า

ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

1. การให้ความร้อนด้วยเทคโนโลยีอินฟราเรดจะทำให้อุณหภูมิที่ผิวของผลิตภัณฑ์สูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนวัตถุดิบบางชนิดที่มีผิวบางอาจเกิดการไหม้เกรียมหรือเสียหายได้ ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังในการใช้งานและควรปรับเปลี่ยนกำลังอินฟราเรดให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์อบแห้ง
2. การพัฒนาต่อยอดควรเพิ่มระบบควบคุมความชื้นภายในห้องอบ เพื่อลดการปล่อยอากาศชื้นที่ออกสู่ภายนอก ซึ่งเป็นการลดปัญหาด้านกลิ่นที่เกิดจากกระบวนการอบแห้งวัตถุดิบที่มีกลิ่นแรง เช่น พริก ใบมะกรูด ตะไคร้ เป็นต้น



กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ในโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับบัณฑิตศึกษา จากวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาในโครงการทุนศิษย์ก้นกุฏิ ประจำปี 2562 จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ทุนวิจัยบัณฑิตศึกษาด้านการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร ประจำปี 2563 จากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) และทุนสนับสนุนงานพื้นฐาน (Fundamental Fund) จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (กองทุนส่งเสริม ววน.) ประจำปี 2562 และ 2563 ผ่านมหาวิทยาลัยแม่โจ้ มา ณ ที่นี้



เอกสารอ้างอิง

- ณัฐวุฒิ ดุษฎี. (2559). *การอบแห้งผลผลิตเกษตรด้วยพลังงานทดแทนพื้นฐานและการประยุกต์ใช้งาน*. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2562). *สถิติการใช้พลังงานในประเทศไทย ปี 2562*. กระทรวงพลังงาน. ประเทศไทย.
- สำนักงานนโยบายและยุทธศาสตร์การค้ากระทรวงพาณิชย์. (2562). *รายงานประจำปี 2562*. กระทรวงพาณิชย์. ประเทศไทย.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2558). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 136/2558*. กระทรวงอุตสาหกรรม. ประเทศไทย.
- Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W., & Hall, C. W. (1992). *Drying and storage of grains and oilseeds*. Van Nostrand Reinhold.

- Charoenvai, S., Yingyuen, W., Jewyee, A., Rattanadecho, P., & Vongpradubchai, S. (2013). Analysis of energy consumption in a drying process of particleboard using a combined multi-feed microwave-convective air and continuous belt system (CMCB). *Thammasat International Journal of Science and Technology*, 18(3), 1–15.
- Nowak, D., & Lewicki, P. P. (2005). Quality of infrared dried apple slices. *Drying Technology*, 23(4), 831–846.
- Ratti, C., & Mujumdar, A. S. (2006). Infrared drying. In Arun S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of industrial drying* (3rd ed.). CRC press.
- Sakare, P., Prasad, N., Thombare, N., Singh, R., & Sharma, S. C. (2020). Infrared drying of food materials: Recent advances. *Food Engineering Reviews*, 12(3), 381–398.
- Sarkar, J., Bhattacharyya, S., & Gopal, M. R. (2006). Transcritical CO₂ heat pump dryer: Part 2, validation and simulation results. *Drying Technology*, 24(12), 1593–1600.
- Tonui, K. S., Mutai, E. B. K., Mutuli, D. A., Mbugu, D. O., & Too, K. V. (2014). Design and evaluation of solar grain dryer with a back-up heater. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 7(15), 3036–3043.