8

การพัฒนาต้นแบบเทคโนโลยีการลดความชื้นผลผลิตทางการเกษตร และวัสดุชีวภาพมูลค่าสูงด้วยอากาศร้อนที่เหมาะสม โดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนร่วม

DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE DEHUMIDIFICATION TECHNOLOGY PROTOTYPE FOR AGRICULTURAL PRODUCTS AND HIGH-VALUE BIOLOGICAL MATERIALS WITH APPRORIATE HOT AIR BY USING COMBINED HEAT SOURCES

วันที่รับ: 4 มิถุนายน 2565
วันที่แก้ไข: 11 พฤศจิกายน 2565
วันที่ตอบรับ: 16 พฤศจิกายน 2565

วศิน์วิโรตม์ เนติศักดิ์[1*], พงษ์ศักดิ์ อยู่มั่น[1], จักรกฤษณ์ ฮั่นยะลา[1], ปฐมพงศ์ พรมมาบุญ[1], ธิติมา คุณยศยิ่ง[1] และ ณิชา นภาพร จงกะสิกิจ[1]

Wasivirot Netisak[1*], Pongsak Youmune[1], Jakkit Hanyala[1], Pathompong Phommaboon[1], Thitima Khunyotying[1] and Nicha Napaporn Jongkasikit[1]

[1]คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง จังหวัดลำปาง 52100

[1]Industrial Technology Faculty, Lampang Rajabhat University, Lampang 52100

[*]Corresponding author e-mail: wasivirot@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนาต้นแบบเทคโนโลยีการลดความชื้นผลผลิตทางการเกษตรและวัสดุชีวภาพมูลค่าสูงด้วยอากาศร้อนที่เหมาะสมโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนร่วมที่เหมาะสมกับพื้นที่ และเพื่อหาแนวทางการควบคุมปัจจัยการเพิ่มอัตราการลดความชื้นและลดปัจจัยเสี่ยงที่ส่งผลเสียต่อคุณภาพที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์แห้ง จากการทดลองอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียปริมาณ 400 กิโลกรัม ที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 16–17 มาตรฐานแห้ง ได้เป็นผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีความชื้นตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อบแห้ง ด้วยเทคโนโลยีโรงเรือนอบแห้งใช้หลักการเรือนกระจกและเตาชีวมวล ใช้เชื้อเพลิงจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย โดยใช้หลักการ Hot Air Tube พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายให้กับขดลวดสร้างความร้อนขนาด 1 Kwh. เพื่อเพิ่มอุณหภูมิร่วมด้วย ซึ่งหลักการทำงาน คือ การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างท่อเหล็กกับลมร้อน พบว่าการใช้เทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นมีสภาวะการทำงานที่เหมาะสมเมื่ออุณหภูมิภายในห้องอบเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส

สามารถลดเวลาในการอบแห้งจากเดิม 72 ถึง 96 ชั่วโมง เหลือเพียง 48 ชั่วโมง ประสิทธิภาพของระบบอบแห้งเพิ่มขึ้นราวร้อยละ 50 โดยระยะเวลาคืนทุนของการใช้เทคโนโลยีอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับเทคโนโลยีความร้อนจากเชื้อเพลิงชีวมวลต้นแบบของงานวิจัยนี้มีค่าประมาณ 1.37 ปี ในส่วนของแนวทางการควบคุมปัจจัย พบว่าปัจจัยด้านความสว่างมีผลต่อคุณสมบัติผลิตภัณฑ์ ดังนั้น จึงต้องจำกัดค่าความสว่างอยู่ที่ 73.63 ± 0.72 ซึ่งทำให้เมล็ดแมคคาเดเมียมีค่าสี (a*) เป็น –2.28 ± 0.35 โดยเมล็ดแมคคาเดเมียที่ผ่านการลดความชื้นทุกเงื่อนไขการทดลอง มีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดน้อยกว่า 25 โคโลนีต่อตัวอย่างอาหาร 1 กรัม (1:10 dilution factor) ผลการตรวจสอบไม่พบยีสต์และรา และสำหรับการวิเคราะห์การปนเปื้อนของอะฟลาทอกซินในผลิตภัณฑ์ แมคคาเดเมียที่ผ่านการลดความชื้นหลังจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 เดือน ตรวจไม่พบสารพิษอะฟลาทอกซินชนิด Aflatoxin B1, Aflatoxin B2, Aflatoxin G1 และ Aflatoxin G2 ทำให้ผลิตภัณฑ์แมคคาเดเมียอบแห้งมีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนเมล็ดแมคคาเดเมีย มผช. 1145/2549

คำสำคัญ: เทคโนโลยีอบแห้ง, พลังงานแสงอาทิตย์, ความร้อนร่วม, พลังงานทดแทน, ชีวมวล, อบแห้งแมคคาเดเมีย

Abstract

The objectives of this research were to develop a moisture reduction prototype for agricultural produces and biomass-based material combined with heat technology suitable for the area to increase the production rate with a solar dryer, and to reduce the risk factors affecting the quality of dehydrated products caused by moisture accumulation during cloudy periods or nights. From the drying experiments of 400 kg of macadamia seeds with an initial moisture content of approximately 16–17% wb until, it became a dehydrated good with a moisture content according to the standard of drying products. Drying house with greenhouse principal technology combined with a biomass stove using fuel from macadamia shells was used with hot air tube principle by using energy from the solar cell power generation system which supplied to the 1 Kwh. and heat generating coil to increase the temperature as well. It was found that the working conditions were suitable when the temperature inside

the incubator was 70 and the drying time was reduced from 72 to 96 hours to only 48 hours. System performance increases about 50%. The payback period of solar drying technology combined with a prototype of biomass-based heat technology in this study was about 1.37 years. Furthermore, the lightness solution of the macadamia was 73.63 ± 0.72 in drying process was most effective for product quality. The result of color measuring of the macadamia passed moist reduction process found that a* is –2.28 ± 0.35. All the macadamia which passed the moist reduction process accordingly to the experimental condition contained microbes less than 25 colonies per 1 gram of sample (1:10 dilution factor). In addition to the test, the sample does'nt infect with mold or yeast. In terms of the containment of the alpha-toxin, the sample was kept for a month at 35 degrees Celsius and did not contaminate the Aflatoxin B1, Aflatoxin B2, Aflatoxin G1, and Aflatoxin G2. Therefore, the macadamia product met the qualifications of the Community Macadamia Product Standard of 2549 [1145/2549]

Keywords: Drying Technology, Solar Energy, Combined Heat, Renewable Energy, Biomass, Macadamia Drying

บทนำ

จากปัญหาภาคการเกษตรของภาคเหนือ พบว่าเศรษฐกิจภาคมีขนาดเล็กโดยมีมูลค่าผลิตภัณฑ์ระดับภาค (GRP) คิดเป็นร้อยละ 7.8 เมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์มวลรวมของประเทศ และมีการขยายตัวต่ำกว่าประเทศร้อยละ 1.8 เหตุจากพื้นที่เศรษฐกิจค่อนข้างกระจุกตัวในจังหวัดใหญ่ (มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ภาควิชาพัฒนาเศรษฐกิจการเกษตร, ม.ป.ป.) ซึ่งภาคการเกษตรในพื้นที่ภาคเหนือตอนบน ได้แก่ พืชผัก ไม้ผล และสมุนไพร เป็นต้น เกษตรกรมีการปรับตัวเป็นเกษตรอินทรีย์มากขึ้นแต่ยังเป็นอินทรีย์วิถีพื้นบ้านอยู่ โดยมีแนวโน้มเป็นเชิงพาณิชย์เพิ่มขึ้น แต่ปัจจุบันมีการแปรรูปสินค้าเกษตรขั้นต้นต่ำ ประกอบกับภาคอุตสาหกรรมที่มีอยู่ร้อยละ 19.2 ยังมีบทบาทน้อยเมื่อเทียบกับระดับประเทศ โครงสร้างสัดส่วนสูงสุด คือ ผลิตภัณฑ์อาหาร คิดเป็นร้อยละ 49.7 (สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดลำปาง, 2563)

สำหรับผลิตภัณฑ์เกษตรมูลค่าสูงที่กล่าวถึงในงานวิจัยนี้ ได้แก่ เมล็ดแมคคาเดเมีย โดยประเทศไทยมีการนำเข้าแมคคาเดเมียทั้งเปลือกในปี 2562 ถึง 1,404.82 ตัน ในขณะที่ในปี 2558 มีการนำเข้าเพียง 5 ตัน (กรมวิชาการเกษตร สถาบันวิจัยพืชสวน, 2564) ซึ่งจะเห็น

ได้ว่า ขนาดตลาดความต้องการของแมคคาเดเมียในประเทศไทยมีปริมาณเพิ่มขึ้นมาก ประกอบกับการดำเนินงานวิจัยและการบริการวิชาการของคณะวิจัยที่ผ่านมา พบว่าเกษตรกรผู้ปลูกแมคคาเดเมียในพื้นที่สูงมีปัญหาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน โดยพื้นที่วิจัยในงานวิจัยนี้คือบ้านแม่แจ๋ม ตำบลแจ้ซ้อน อำเภอเมืองปาน จังหวัดลำปาง เนื่องจากสภาพภูมิประเทศไม่เอื้อต่อการลดความชื้นของผลผลิตทางการเกษตร เนื่องจากมีร้อยละความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมสูง โดยเฉพาะพื้นที่วิจัยเป็นเขตป่าชื้น ส่งผลให้อากาศโดยเฉลี่ยมีอุณหภูมิต่ำ และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูงกว่าพื้นที่ราบ ส่งผลทำให้การแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรในกระบวนการลดความชื้นขั้นต้นก่อนการจำหน่ายไม่มีคุณภาพเท่าที่ควร (สุรชัย เหมหิรัญ และประชา บุณยวานิชกุล, 2560, น. 60–68) จึงทำให้ราคาขายไม่สูงเท่าที่ควร ซึ่งมีความจำเป็นในการนำเทคโนโลยีที่เหมาะสมมาใช้ในกระบวนการลดความชื้นของผลผลิตในพื้นที่อย่างเร่งด่วน (สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง, 2562)

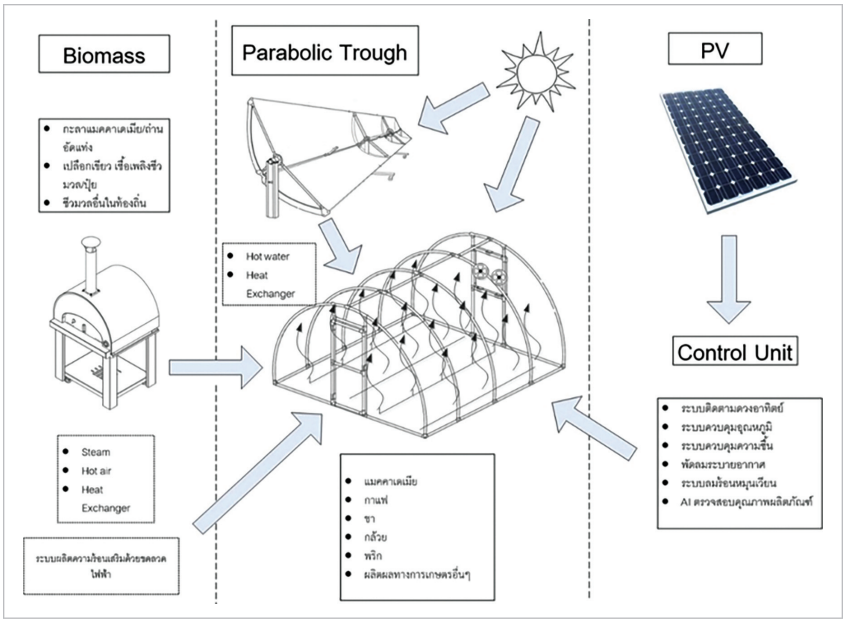
ดังนั้น คณะวิจัยจึงมีความสนใจและเกิดแนวความคิดในการแก้ไขปัญหาการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรและวัสดุชีวภาพมูลค่าสูง ในขั้นตอนการลดความชื้นด้วยอากาศร้อนที่ผลิตขึ้นจากแหล่งพลังงานทดแทนในพื้นที่ขั้นต้น การใช้กระบวนการอบแห้งที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการยืดระยะเวลาในการเก็บรักษา (อณัฐธิชา จันทะพันธ์ และคนอื่น ๆ, 2564, น. 53–64) เพื่อเป็นการพัฒนาประสิทธิภาพเทคโนโลยีลดความชื้นวัสดุทางการเกษตรชีวภาพคุณภาพต้นแบบ สำหรับการสังเคราะห์องค์ความรู้และพัฒนาแนวทางการใช้เทคโนโลยีการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรที่สำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ และผลผลิตทางการเกษตรที่เกิดใหม่ของภาคเหนือตอนบนให้ความเหมาะสมและมีความคุ้มค่ามากที่สุด ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ตรงตามมาตรฐานและราคาขายที่สูงขึ้น จนนำไปสู่การเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันให้กับประเทศในระยะยาวต่อไป และด้วยระบบการอบแห้งที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนั้นเป็นวิธีการผลิตความร้อนจากรางรวมแสงพาลาโบลิก ซึ่งเป็นกลไกแมคคานิคมีการเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลาที่ทำงาน ซึ่งจำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาระบบเป็นประจำเพื่อไม่ให้เกิดการทำงานที่สะดุดหรือติดขัด จึงทำให้ไม่สะดวกในการใช้งานแก่เกษตรกรที่ไม่สามารถบำรุงรักษาระบบเองได้ ประกอบกับการสำรวจพบว่ามีเศษวัสดุชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรในพื้นที่ ได้แก่ กะลาแมคคาเดเมียเป็นจำนวนมาก จึงเกิดเป็นแนวคิดการนำเอาเศษวัสดุชีวมวลเหลือทิ้งเหล่านั้นมาใช้ให้เกิดประโยชน์ทางด้านพลังงานที่คุ้มค่ามากที่สุด

วัตถุประสงค์การวิจัย

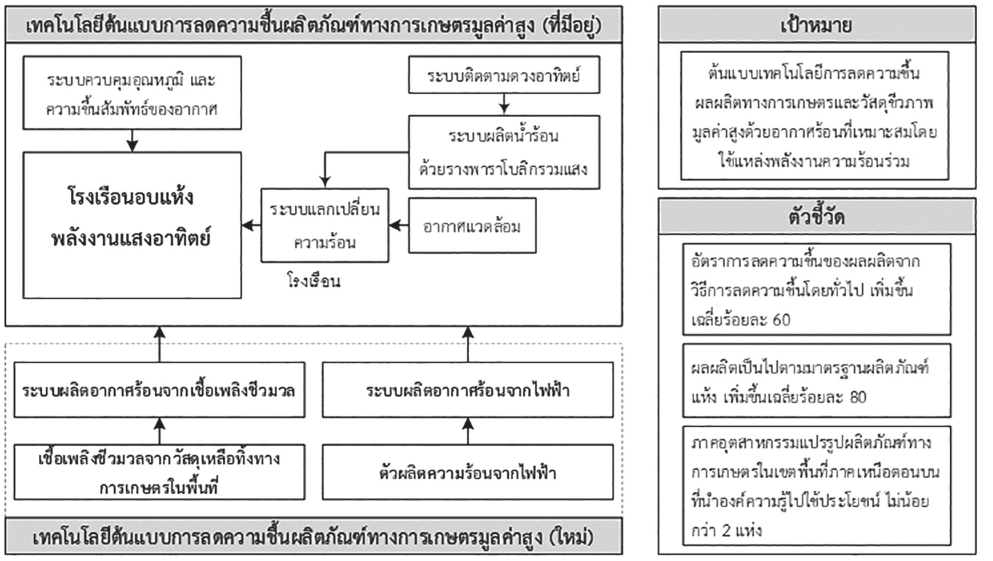
1. เพื่อพัฒนาต้นแบบเทคโนโลยีการลดความชื้นผลผลิตทางการเกษตรและวัสดุชีวภาพมูลค่าสูงด้วยอากาศร้อนที่เหมาะสมโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนร่วมที่เหมาะสมกับพื้นที่
2. เพื่อหาแนวทางการควบคุมปัจจัยการเพิ่มอัตราการลดความชื้นและลดปัจจัยเสี่ยงที่ส่งผลเสียต่อคุณภาพ ที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์แห้ง

กรอบแนวความคิดในการวิจัย

โครงการวิจัยนี้เป็นการพัฒนาต่อยอดองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยที่ผ่านมา โดยจากระบบเดิมที่เป็นการใช้ความร้อนจากรางรวมแสงพาราโบลิกมาผลิตความร้อนสำหรับโรงเรือนอบแห้งนั้น พบปัญหาการบำรุงรักษาระบบของเกษตรกรไม่สามารถทำได้ ประกอบกับสำรวจพบศักยภาพของชีวมวลในพื้นที่ สามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตความร้อนให้กับระบบโรงเรือนอบแห้งได้ จึงได้เกิดแนวคิดนำชีวมวลมาใช้เป็นความร้อนเสริม โดยออกแบบให้ทำงานร่วมกับระบบเดิม ซึ่งคณะวิจัยได้ควบรวมระบบผลิตความร้อนจากแหล่งพลังงานทดแทนที่หาได้จากในพื้นที่เข้ากับเทคโนโลยีอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อลดความชื้นของผลผลิตทางการเกษตร โดยกระบวนการวิจัยจะทำการทดสอบสมรรถนะและประสิทธิภาพของเทคโนโลยีต้นแบบ และทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรมูลค่าสูงเพื่อใช้เป็นแนวทางในการขยายผลสู่ภาคอุตสาหกรรมแปรรูปในพื้นที่ต่อไป โดยสมมติฐานงานวิจัยแสดงในภาพ 1 และกรอบแนวความคิดในการวิจัยแสดงในภาพ 2



ภาพ 1 สมมติฐานการวิจัย



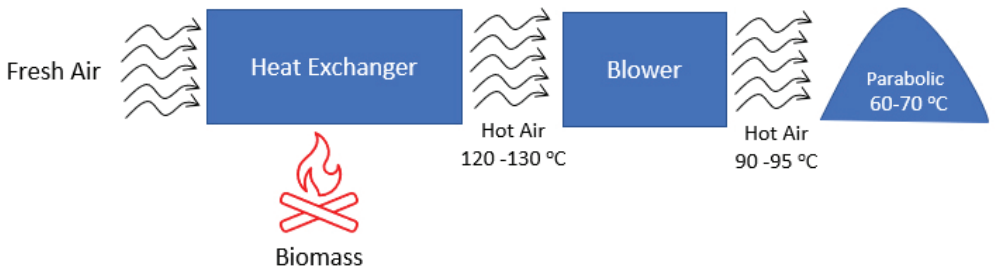
ภาพ 2 กรอบการวิจัย เป้าหมาย และตัวชี้วัด

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการพัฒนาต้นแบบเทคโนโลยี เน้นการนำศักยภาพทางด้านพลังงานที่มีอยู่ในพื้นที่มาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด สำหรับขั้นตอนในการพัฒนานั้น รายละเอียดมีดังนี้

1. ตัวโรงเรือนอบแห้งใช้หลักการเรือนกระจก มีโครงสร้างเป็นเหล็กเส้นดัดโค้ง ขนาด 360 × 480 × 290 เซนติเมตร ผนังคลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตโปร่งแสง สามารถอบแห้งผลิตภัณฑ์แมคคาเดเมียได้ประมาณ 400 กิโลกรัมต่อครั้ง

2. เตาชีวมวลใช้เชื้อเพลิงจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย โดยใช้หลักการ Hot Air Tube เพื่อผลิตอากาศร้อนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิภายในโรงเรือนอบแห้งในกรณีที่ความเข้มรังสีอาทิตย์มีไม่เพียงพอ ประกอบกับการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายให้กับขดลวดสร้างความร้อนขนาด 1 Kwh เพื่อเพิ่มอุณหภูมิร่วมด้วย โดยระบบจะเป็นการให้ความร้อนโดยตรง (Direct Dryer) และให้ความร้อนแบบพาความร้อน (Convection Dryer) โดยใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ซึ่งหลักการทำงาน คือ การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างท่อเหล็กกับลมร้อน โดยให้ความร้อนกับท่อเหล็กด้วยชีวมวล และใช้เครื่องเป่าลมไฟฟ้า (Blower) เพื่อเป่าให้อากาศพัดผ่านเข้าไปสัมผัสท่อกับเหล็กจนกลายเป็นลมร้อนและปล่อยเข้าสู่ห้องอบต่อไป โดยแนวคิดระบบผลิตอากาศร้อนจากเชื้อเพลิงแสดงดังภาพ 3



ภาพ 3 แนวคิดระบบผลิตอากาศร้อนจากเชื้อเพลิง

สำหรับการออกแบบเตาเผาชีวมวล ใช้สมการการหาอัตราการไหลเชิงมวลเพื่อคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของการนำความร้อนดังสมการ (1)

$$m^{\circ} = \rho 1\ v1\ A1 = \rho 2\ v2\ A2 \qquad (1)$$

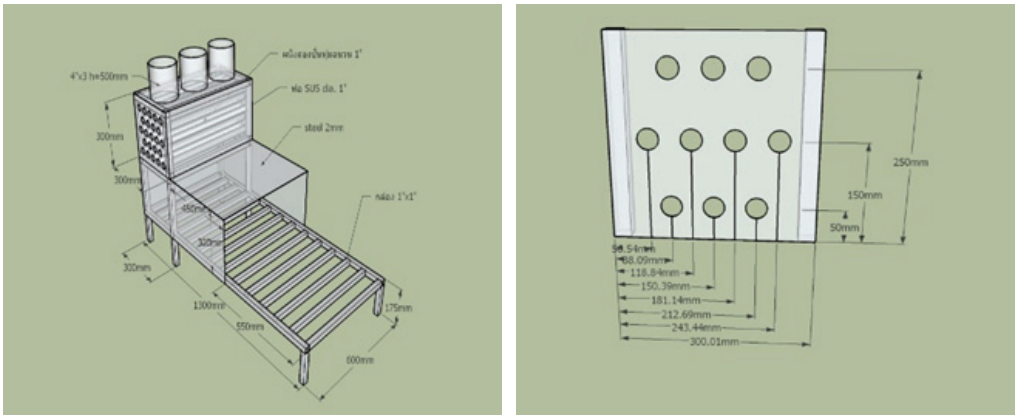
โดย m° = อัตราการไหลเชิงมวล
ρ = ความหนาแน่นมวลของไหล
v = ความเร็วในการไหล
A = พื้นที่เวกเตอร์หน้าตัด / พื้นผิว

จากการคำนวณได้ผลดังตาราง 1

ตาราง 1 ผลการคำนวณอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

CASE	Te = อุณหภูมิด้านออกของท่อ (°C)	Ts = อุณหภูมิที่ผิวท่อ (oC)	Ti = อุณหภูมิด้านเข้าของท่อ (°C)	H = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2.°K$)	D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)	N = จำนวนท่อ	m° = อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)	c_p = ค่าความหนาแน่นจำเพาะของอากาศ (kg/m^3)	As = พื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อน (m^2)	L = ความยาวของท่อ (m)
A	118	400	116	66.0	0.0254	10	0.69	1010.8	0.08	0.10
B	120	400	116	66.0	0.0254	10	0.77	1011.0	0.18	0.23
C	122	400	116	66.0	0.0254	10	0.86	1011.2	0.27	0.34
D	124	400	116	66.0	0.0254	10	0.94	1011.4	0.40	0.50
E	**125**	**400**	**116**	**66.0**	**0.0254**	**10**	**1.03**	**1011.5**	**0.48**	**0.60**
F	126	400	116	66.0	0.0254	10	1.12	1011.6	0.61	0.76
G	128	400	116	66.0	0.0254	10	1.20	1011.8	0.79	0.99
H	130	400	116	66.0	0.0254	10	1.29	1012.0	1.00	1.25

จากตาราง 1 คณะวิจัยเลือกใช้ผลการคำนวณจากกรณี E เนื่องจากมีค่าอัตราการไหลเชิงมวลใกล้เคียง 1 มากที่สุด จะได้ค่าพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อนอยู่ 0.48 ตารางเมตรและมีค่าความยาวท่ออยู่ที่ 0.6 เมตร



ภาพ 4 การออกแบบเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวล

3. การทดลองลดความชื้นของเมล็ดแมคคาเดเมีย โดยมีรูปแบบเงื่อนไขการทดลองดังนี้

3.1 ใช้โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว (SD: Solar Dry)

3.2 ใช้โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลา (SPD: Solar + Parabolic Dry)

3.3 ใช้โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบผลิตความร้อนด้วยพลังงานชีวมวล (SBD: Solar + Bio Dry)

3.4 ใช้โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบผลิตความร้อนโดยใช้ไฟฟ้า (SED: Solar + Electric Dry)

3.5 ใช้ระบบผลิตความร้อนร่วมทุกระบบร่วมกัน (CPD: Combined Process Dry)

4. ทำการวัดและบันทึกค่าอุณหภูมิภายในโรงเรือนอบแห้งตามจุดต่าง ๆ ด้วยเทอร์โมคัพเปิลและดาด้าล็อกเกอร์

5. วิเคราะห์และประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์แห้งตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์แมคคาเดเมียชุมชน (มผช. 1145/2549) ด้วยการส่งทดสอบที่ห้องปฏิบัติการตามวิธีมาตรฐานทางเคมีและวิธีมาตรฐานทางจุลชีววิทยา ได้แก่ ค่าสี ความชื้น และเชื้อรา โดยมีการสุ่มตรวจตัวอย่างร้อยละ 25 สุ่มตัวอย่างซ้ำ 4 รอบ จากผลิตภัณฑ์แมคคาเดเมียอบแห้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งที่ทำการทดลองจากทุกกระบวนการ

ผลการวิจัย

คณะวิจัยได้สร้างและพัฒนาระบบอบแห้งให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ให้เหมาะสมกับพื้นที่เป้าหมาย คือ บ้านแม่แจ่ม ตำบลแจ้ซ้อน อำเภอเมืองปาน จังหวัดลำปาง ซึ่งผลการดำเนินโครงการวิจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

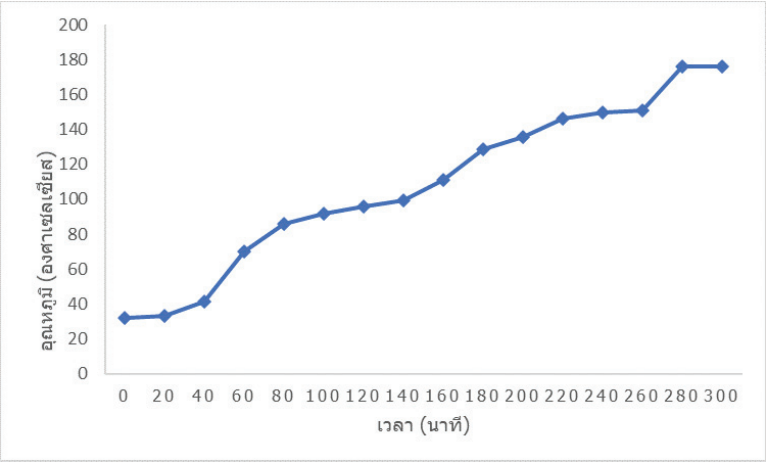
1. โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับความร้อนเสริมนี้ถูกออกแบบให้สามารถใช้แหล่งพลังงานได้ทั้งจากพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานความร้อนจากชีวมวลในพื้นที่ ซึ่งการใช้พลังงานร่วมกันนี้จะทำให้ยิ่งลดความชื้นได้ดียิ่งขึ้นและลดข้อจำกัดของพลังงานแสงอาทิตย์ด้านเวลาลงได้

ผลการวิจัยสามารถตอบสนองความต้องการของกลุ่มวิสาหกิจทั้งในเชิงเทคนิคที่พบว่าระบบอบแห้งผลิตภัณฑ์แมคคาเดเมียนี้สามารถใช้งานได้ตามขอบเขตเงื่อนไขการใช้งาน ได้แก่ สามารถลดเวลาในการอบแห้งได้จาก 3–4 วัน เหลือเพียง 2 วันเท่านั้น อีกทั้งยังสามารถเพิ่มกำลังการผลิตจากเดิมปีละประมาณ 12 ตัน เพิ่มเป็นปีละมากกว่า 20 ตัน

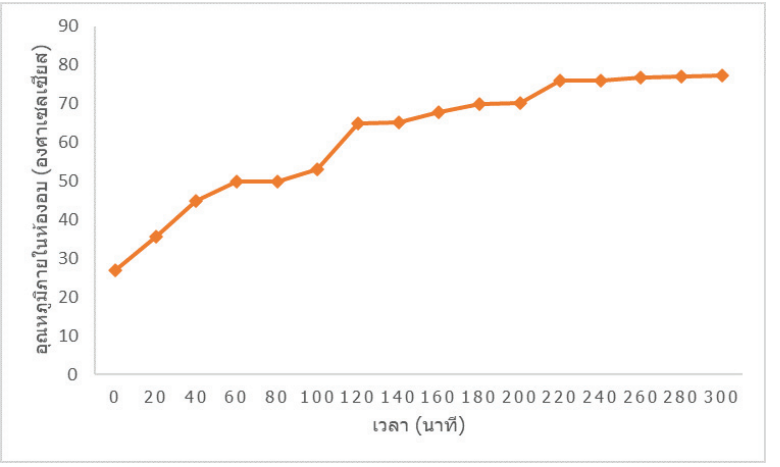
2. ผลการศึกษาอุณหภูมิห้องเผาไหม้ของห้องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับความร้อนเสริม พบว่ามีค่าค่อนข้างสูง เนื่องจากค่าความร้อนของเปลือกแมคคาเดเมียมีความร้อนสูง ทำให้อุณหภูมิเผาไหม้สูง ดังแสดงในภาพ 5

ในส่วนของอุณหภูมิในห้องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับความร้อนเสริมมีการกระจายตัวค่อนข้างดี อยู่ในช่วง 70 องศาเซลเซียส ดังภาพ 6

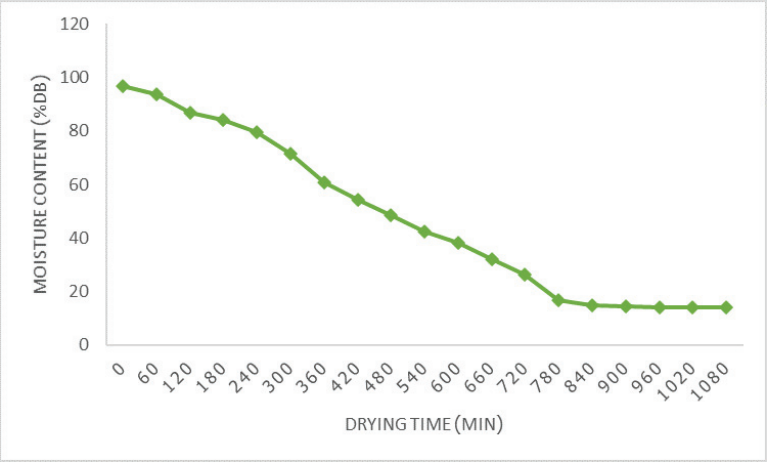
อัตราการอบแห้ง พบว่าทั้งห้องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับความร้อนเสริมสามารถอบแห้งแมคคาเดเมียน้ำหนัก 400 กิโลกรัม ให้แห้งตามมาตรฐาน มผช. 1145/2549 ได้ภายในระยะเวลา 48 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพ 7 โดยมีการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล คิดเป็น 50 กิโลกรัมต่อรอบการอบแห้ง



ภาพ 5 กราฟค่าความร้อนของเปลือกแมคคาเดเมีย



ภาพ 6 กราฟอุณหภูมิในห้องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับความร้อนเสริม



ภาพ 7 กราฟอัตราการอบแห้ง

ผลการศึกษาคุณภาพผลิตภัณฑ์แมคคาเดเมีย

เพื่อได้ให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ตามมาตรฐาน มผช. 1145/2549 นั้น จำเป็นต้องตรวจสอบค่าสี ปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ ค่าเปอร์ออกไซด์ และปริมาณจุลินทรีย์ที่พบในตัวแมคคาเดเมียอบแห้ง ซึ่งจากการทดสอบได้ผลการทดสอบดังนี้

1. ด้านค่าสี

การวัดค่าสีของเมล็ดแมคคาเดเมียที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการลดความชื้นโดยใช้โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว (SD), พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับราง

รวมแสงพาราโบลา (SPD), พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบผลิตความร้อนด้วยพลังงานชีวมวล (SBD), พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบผลิตความร้อนโดยใช้ไฟฟ้า (SED) และใช้ระบบผลิตความร้อนรวมทุกระบบร่วมกัน (CPD) ใช้วิธีการนำเมล็ดที่สิ้นสุดการอบแห้งที่มีความชื้นประมาณไม่เกินร้อยละ 1.50 ฐานแห้ง มากะเทาะเปลือกกะลาออกและจะได้เนื้อในแล้วนำไปวัดค่าสี ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงในตาราง 2

ตาราง 2 ค่าสีของเมล็ดแมคคาเดเมียที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการลดความชื้นทั้ง 5 กระบวนการ

สิ่งทดลอง	เวลาในการลดความชื้น (ชั่วโมง)	ค่าสี		
		L*	a*	b*
SD	48	71.32 ± 0.51	3.76 ± 0.32	24.50 ± 1.55
SPD	48	73.54 ± 0.81	–2.82 ± 0.82	26.56 ± 1.14
SBD	48	73.16 ± 0.85	–2.80 ± 0.64	26.18 ± 1.17
SED	48	73.76 ± 1.60	–2.98 ± 1.34	26.47 ± 1.43
CPD	48	73.63 ± 0.72	–2.28 ± 0.35	26.26 ± 0.20

ภาพ 8 ลักษณะของเมล็ดแมคคาเดเมียที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการลดความชื้นโดยใช้โรงเรือนอบแห้ง

2. ปริมาณความชื้น

เมล็ดแมคคาเดเมียที่ผ่านการลดความชื้นทุกเงื่อนไขการทดลองมีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 0.91–1.14 ฐานแห้ง สามารถเก็บรักษาได้นาน การเปลี่ยนแปลงรสชาติและคุณภาพทางเคมีลดลง เนื่องจากความชื้นต่ำทำให้การเสื่อมสภาพของกรดไขมันอิสระและน้ำตาลรีดิวซิ่งที่สะสมในเนื้อในของเมล็ดแมคคาเดเมียเกิดได้ช้า ซึ่งความชื้นที่สูงจะเพิ่มสัดส่วนของสีน้ำตาลในเนื้อในของเมล็ดแมคคาเดเมีย เนื่องจากน้ำมีบทบาทสำคัญต่อการทำงานของเอนไซม์ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการเสื่อมสภาพของเนื้อใน การอบแห้งเป็นหนึ่งในขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการแปรรูปของเมล็ดแมคคาเดเมีย การดำเนินการอบแห้งจะเริ่มหลังจากการเก็บเกี่ยว ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกลิ่น ควรอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียให้มีความชื้นประมาณร้อยละ 1.5 ฐานแห้ง จึงจะสามารถเก็บไว้ได้ถึงหนึ่งปี โดยไม่สูญเสียคุณภาพ

3. วอเตอร์แอคติวีตี้ (a_w)

ค่า a_w หรือปริมาณน้ำอิสระของเมล็ดแมคคาเดเมียเป็นตัวชี้วัดของน้ำที่มีอยู่ได้อย่างอิสระและตอบสนองสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ที่สามารถที่เกี่ยวข้องโดยตรงหรือโดยอ้อมกับความชื้น ซึ่งค่า a_w จะเป็นประโยชน์ในการทำนายการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีหลายอย่างที่สามารถเกิดขึ้นได้ นอกจากนี้ยังพบว่าค่า a_w มีผลต่อคุณภาพของเมล็ดแมคคาเดเมีย จากการทดลองนี้ เมล็ดแมคคาเดเมียที่ผ่านการลดความชื้นทุกเงื่อนไขการทดลอง มีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.2520–0.3127 (ดังตาราง 3) ซึ่งหากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง a_w กับอัตราการเสื่อมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ จะเห็นได้ว่าค่า a_w อยู่ในระดับที่การเจริญของจุลินทรีย์และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากจุลินทรีย์ทุกชนิดจะหยุดการเจริญเมื่อมีค่า a_w เท่ากับ 0.6 หรือต่ำกว่า เชื้อราจะหยุดการเจริญเมื่อ a_w มีค่าเท่ากับ 0.7 หรือต่ำกว่า และยีสต์จะเริ่มเจริญเติบโตได้เมื่อผลิตภัณฑ์มีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.7–0.8 ส่วนแบคทีเรียจะเริ่มเจริญเมื่อค่า a_w มากกว่า 0.8 นับได้ว่าค่า a_w เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณภาพและการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์อาหาร

4. ค่าเปอร์ออกไซด์

เมล็ดแมคคาเดเมียที่ผ่านการลดความชื้นทุกเงื่อนไขการทดลอง มีค่าเปอร์ออกไซด์อยู่ในช่วง 3.44–3.78 meq O_2/kg oil (ดังตาราง 3) ซึ่งตามมาตรฐานผลิตชุมชน (มผช. 1145/2549) กำหนดไว้ว่าเมล็ดแมคคาเดเมียอบแห้ง ต้องมีค่าเปอร์ออกไซด์ไม่เกิน 30 meq O_2/kg oil จึงไม่สูญเสียคุณภาพ แสดงให้เห็นว่าทุกเงื่อนไขการทดลองมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะไม่ทำให้เมล็ดแมคคาเดเมียเสื่อมคุณภาพทางเคมีและคุณค่าทางโภชนาการ

อย่างไรก็ตามการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงและระยะเวลานาน จะส่งผลให้มีการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันให้มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงมากขึ้น ทำให้ค่าเปอร์ออกไซด์สูง เนื่องจากย่อยสลายไขมันไม่อิ่มตัวและเกิดการหืนโดยออกซิเดชัน ดังนั้นหากต้องการลดการสูญเสียคุณภาพและสารสำคัญในเมล็ดแมคคาเดเมียไว้ให้มากที่สุด ต้องใช้ระยะเวลาในการทำแห้งที่สั้น เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ

ตาราง 3 ปริมาณความชื้น ค่า a_w และค่าเปอร์ออกไซด์ของเมล็ดแมคคาเดเมียที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการลดความชื้นทั้ง 5 กระบวนการ

สิ่งทดลอง	เวลาในการลดความชื้น (ชั่วโมง)	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	วอเตอร์แอคติวีตี้ (a_w)	Peroxide value (meq O_2/kg oil)
SD	48	1.14 ± 0.11	0.3127 ± 0.01	3.72 ± 0.58
SPD	48	1.05 ± 0.08	0.2888 ± 0.03	3.78 ± 0.97
SBD	48	0.91 ± 0.06	0.2494 ± 0.01	3.67 ± 0.67
SED	48	0.95 ± 0.05	0.2544 ± 0.01	3.78 ± 0.34
CPD	48	0.98 ± 0.03	0.2520 ± 0.01	3.44 ± 0.28

5. ปริมาณจุลินทรีย์

เมล็ดแมคคาเดเมียที่ผ่านการลดความชื้นทุกเงื่อนไขการทดลอง มีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดน้อยกว่า 25 โคโลนีต่อตัวอย่างอาหาร 1 กรัม (1:10 dilution factor) และตรวจไม่พบยีสต์และรา (ดังตาราง 4) ซึ่งอยู่ในมาตรฐาน มผช. 1145/2549 ที่กำหนดไว้ว่าจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดต้องไม่เกิน 1×10^6 โคโลนีต่อตัวอย่างอาหาร 1 กรัม ยีสต์และราต้องไม่เกิน 100 โคโลนีต่อตัวอย่างอาหาร 1 กรัม แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ได้จากการทดลองปลอดภัยจากการเสื่อมเสียเนื่องจากจุลินทรีย์ ทั้งนี้เนื่องจากการเจริญของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์อาหารจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณน้ำในอาหาร ซึ่งเมล็ดแมคคาเดเมียที่ผ่านการลดความชื้นทุกเงื่อนไขการทดลอง มีค่า a_w ต่ำกว่า 0.6 และมีปริมาณความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 1.5 ฐานแห้ง จึงเป็นการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ทุกชนิด

ตาราง 4 ปริมาณจุลินทรีย์ในเมล็ดแมคคาเดเมียที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการลดความชื้นทั้ง 5 กระบวนการ

สิ่งทดลอง	เวลาในการลดความชื้น (ชั่วโมง)	ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (โคโลนีต่อตัวอย่างอาหาร 1 กรัม)	ยีสต์และรา (โคโลนีต่อตัวอย่างอาหาร 1 กรัม)
SD	48	< 25	ไม่พบ
SPD	48	< 25	ไม่พบ
SBD	48	< 25	ไม่พบ
SED	48	< 25	ไม่พบ
CPD	48	< 25	ไม่พบ

อภิปรายผลการวิจัย

การลดเวลาในกระบวนลดความชื้นของผลิตภัณฑ์จากเดิมใช้เวลา 3–4 วัน เหลือ 2 วัน โดยคงคุณภาพได้ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนเมล็ดแมคคาเดเมีย มผช. 1145/2549 ซึ่งถ้าการทำให้แห้งไม่เร็วพอจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพต่ำลง ดังนั้นจำเป็นต้องมีการอบแห้งช่วงแรกด้วยเครื่องอบแห้งเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา เพื่อรอกระบวนการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ต่อไป (ณิชาภัทร มูลรัตน์ และคนอื่น ๆ, 2564, น. 199–200) ทำให้สามารถลดขั้นตอนและเวลาที่ใช้ในการผลิต การระบายความชื้นที่เหมาะสม ทำให้ความชื้นภายในวัสดุและอัตราการอบแห้งลดลงได้เร็วขึ้น (สุห์ดี นิเซ็ง และคนอื่น ๆ, 2562, น. 158–168) ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนบ้านแม่แจ่มเพิ่มสูงขึ้น โดยมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำลง เนื่องจากไม่ต้องเสียค่าไฟฟ้าและค่าแก๊ส LPG ในขั้นตอนการอบแห้งทำให้ผลกำไรเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังสามารถนำเอากะลาแมคคาเดเมียซึ่งเป็นขยะเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตมาใช้ให้เกิดประโยชน์อีกด้วย แต่ขั้นตอนในการใช้งานระบบจำเป็นจะต้องใช้แรงงานคนในการเติมเชื้อเพลิงให้กับเตาชีวมวลผลิตความร้อน ทำให้ไม่สะดวกในการใช้งาน และเกิดควันมากตอนเริ่มจุดเตา เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้มีความชื้นสูงและมีน้ำมันแมคคาเดเมียตกค้างอยู่ อาจส่งผลกระทบกับบริเวณใกล้เคียงและรบกวนนักท่องเที่ยว โดยทางคณะวิจัยต้องมีการปรับปรุงระบบการป้อนเชื้อเพลิงและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลที่จะนำมาใช้งานกับระบบต่อไป เพื่อเป็นการลดข้อเสียและผลกระทบดังที่กล่าวข้างต้น

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

จากการพัฒนาต้นแบบเทคโนโลยีการลดความชื้นผลผลิตทางการเกษตรและชีวมวลมูลค่าสูงด้วยอากาศร้อนที่เหมาะสมโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนร่วม มีความเหมาะสมกับการใช้งานในพื้นที่บ้านแม่แจ่ม เพราะเป็นการนำเศษชีวมวลเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถลดเวลาในการอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียจาก 3–4 วัน เหลือเพียง 2 วัน จากการใช้งานพบว่าเทคโนโลยีอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับความร้อนเสริม ใช้เวลาในการอบแห้ง 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อัตราการอบแห้งแมคคาเดเมียปริมาณ 400 กิโลกรัม ในการผลิตแมคคาเดเมีย 1 ครั้ง มีต้นทุนการผลิตทั้งหมด รวมค่าแรง ค่าไฟฟ้า ค่าเชื้อเพลิง เท่ากับ 275,000 บาท โดยเฉลี่ยทำการผลิต 20 ครั้ง/ปี ราคา 100 บาท/100 กรัม ดังนั้นใน 1 ปี จะสามารถขายได้เป็นเงิน 200,000 บาท ต้นทุนประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นเงิน 275,000 บาท คิดเป็นกำไรเท่ากับ 200,000 บาท/ปี ดังนั้นระยะคืนทุนของเทคโนโลยีอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับความร้อนเสริม เท่ากับ 1.37 ปี

สำหรับแนวทางการควบคุมปัจจัยการเพิ่มอัตราการลดความชื้นและลดปัจจัยเสี่ยงที่ส่งผลเสียต่อคุณภาพที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์แห้งนั้น คือ กระบวนการในการตากแห้งผลิตภัณฑ์ ที่ทำให้สูญเสียความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งไปโดยเปล่าประโยชน์ ซึ่งจากการวิจัยพบว่าประสิทธิภาพของระบบลดความชื้นของผลิตภัณฑ์แมคคาเดเมียในพื้นที่วิจัยซึ่งเป็นเขตป่าชื้น ส่งผลให้สภาพอากาศโดยเฉลี่ยมีอุณหภูมิที่ต่ำ และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่สูงกว่าพื้นที่ราบ จำเป็นต้องมีการปรับปรุงกระบวนการทำงานของผู้ใช้งานบ้าง

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

1. พิจารณาคุณสมบัติของชีวมวลที่จะนำมาเป็นเชื้อเพลิง
2. ควบคุมการเผาไหม้ไม่ให้เกิดควันมากจนรบกวนบริเวณใกล้เคียง

ข้อเสนอแนะในการวิจัยทำครั้งต่อไป

1. ปรับรูปแบบการนำผลิตภัณฑ์เข้าและออกจากโรงเรือนโดยลดจำนวนการเปิดประตูโรงเรือน และจัดให้มีผ้าตาข่ายรองผลิตภัณฑ์ในแต่ละรอบ
2. ปรับปรุงระบบการป้อนเชื้อเพลิงให้สะดวกมากขึ้น
3. ลดระยะเวลาในการเปิดประตูเพื่อลดการสูญเสียความร้อนภายในโรงเรือน

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง และสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนทุนวิจัย และให้คำแนะนำในกระบวนการดำเนินงานวิจัยตั้งแต่ต้นทางจนกระทั่งปลายทาง ขอบคุณกลุ่มวิสาหกิจชุมชนบ้านแม่แจ่มและไร่สุวรรณ์ ในการเอื้อเฟื้อข้อมูล สถานที่ และให้ความร่วมมือไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร สถาบันวิจัยพืชสวน. (2564). *สถานการณ์การผลิตมะคาเดเมีย.* https://www.doa.go.th/hort/wp-content/uploads/2021/01/สถานการณ์การผลิตมะคาเดเมีย_มกราคม64.pdf

ณิชาภัทร มูลรัตน์, อารีย์ อัจฉริยวิริยะ, และศิวะ อัจฉริยวิริยะ. (2564). การพัฒนาการทำแห้งเมล็ดกาแฟโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานชีวมวลสำหรับการทำแห้งช่วงแรก. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 31(2), 191–200.

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ภาควิชาพัฒนาเศรษฐกิจการเกษตร. (ม.ป.ป.). *การพัฒนาการเกษตรบนพื้นที่สูง.* https://agecon-extens.agri.cmu.ac.th/Course_online/Course/352103/352103%20(section%20002)%20หลักการเกษตรทั่วไป/บทที่%2010%20การพัฒนาการเกษตรบนพื้นที่สูง.pdf

สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง. (2562, 25 ตุลาคม). *เกี่ยวกับสภาพพื้นที่สูง.* https://www.hrdi.or.th/About/Highland

สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดลำปาง. (2563, 25 ตุลาคม). ข้อมูลพื้นฐานของจังหวัดลำปาง. https://www.opsmoac.go.th/lampang-dwl-files-421691791027

สุรชัย เหมหิรัญ และประชา บุณยวานิชกุล. (2560). การทบทวนวิธีการควบคุมการลดความชื้นข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 24(1), 60–68.

สุห์ดี นิเซ็ง, ภาณุมาศ สุยบางดำ, กฤษณพงศ์ สังขวาสี, และสุพัตรา เพ็งเกลี้ยง. (2562). การศึกษาผลของขนาดช่องระบายความชื้นสำหรับการอบแห้งพริก ด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานผสมผสาน. *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย*, 11(1), 158–168.

อณัฐธิชา จันทะพันธ์, สุมล แซ่เฮง พิสิษฐ์สังฆการ, และธนิต สวัสดิ์เสวี. (2564). การอบแห้งใบกะเพราด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*, 17(1), 53–64.