

การวิเคราะห์พลังงานของระบบการอบลมร้อนสำหรับมันสำปะหลังทอด

ENERGY ANALYSIS OF HOT AIR DRYING SYSTEM FOR FRIED CASSAVA CHIPS

ฐานวิทย์ แนนไส*, อธิโรจน์ มะโน, สหพงศ์ สมวงศ์, วรพงศ์ บุญช่วยแทน

Thanwit Naemsai*, Athirot Mano, Sahapong Somwong, Worapong Boonchouytan

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อ.เมือง จ.สงขลา ประเทศไทย 90000

Faculty of engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang, Songkhla, Thailand, 90000

*Corresponding author e-mail: Thanwit.n@rmuts.ac.th

วันที่ได้รับระบบ 28 กุมภาพันธ์ 2567

วันที่แก้ไขบทความ 9 กรกฎาคม 2567

วันที่ตอบรับบทความ 15 กรกฎาคม 2567

บทคัดย่อ

กระบวนการบรรจุขนมแผ่นมันสำปะหลังทอดแบบดั้งเดิมสำหรับส่งขายต้องใช้เวลาถึงประมาณ 12 h ในการดูดซับน้ำมันหลังจากการทอด แนวทางการอบลมร้อนจึงมีความน่าสนใจในการนำมาใช้ไล่น้ำมันเพื่อลดเวลาและเพิ่มผลผลิต ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบค่าอุณหภูมิการอบแห้งที่มีต่อค่าพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งขนมแผ่นมันสำปะหลังทอดด้วยเครื่องอบแห้งแบบใช้เตาแก๊สอินฟราเรด นอกจากนี้ยังหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการประหยัดพลังงานของกระบวนการอบแห้งขนมแผ่นมันสำปะหลังทอดเช่นกัน เครื่องอบแห้งประกอบด้วย ห้องอบแห้งรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $120 \times 120 \times 120$ cm สำหรับบรรจุขนมแผ่นมันสำปะหลังทอดได้ 5 kg พัดลมระบายอากาศ ขนาด 22.86 cm และเตาแก๊สอินฟราเรด ในการทดลองจะปรับเปลี่ยนค่าอุณหภูมิในการอบแห้ง 3 ค่าได้แก่ 50 60 และ 70 °C โดยทุกกรณีใช้เวลาในการอบแห้ง 2 h จากการทดลองพบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิทั้งห้องมีความสม่ำเสมอและผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างด้านบนและด้านล่างของเครื่องอบแห้งมีค่าเพียง 1.3 °C เมื่อวิเคราะห์ทางด้านพลังงานพบว่าค่าความสิ้นเปลืองจำเพาะของกรณีที่มีค่าอุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C มีค่า 351 282 และ 323 kW/kg ตามลำดับ ดังนั้นค่าอุณหภูมิอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับขนมแผ่นมันสำปะหลังทอดคือ 60 °C และให้ค่าระยะเวลาคืนทุนเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิมประมาณ 3 month

คำสำคัญ: พลังงาน, ลมร้อน, อบแห้ง, มันสำปะหลังทอด

Abstract

The conventional method of packaging fried cassava chips before shipping takes about 12 hours for oil absorption in fried foods; therefore, the hot air-drying system to remove excess oil is interesting for time reduction with an increase in productivity. The aim is therefore to experimentally investigate the effect of the drying temperature on the energy consumption when drying the fried cassava chips using the dryer with an infrared oven. In addition, the appropriate energy-saving condition when drying the fried cassava chips was also determined. The dryer consisted of a cubic drying chamber measuring 120 x 120 x 120 cm to hold the 5 kg of fried cassava chips, a fan with a diameter of 22.86 cm, and an infrared burner. The drying temperature was examined at three different experimental values, for example, 50, 60, and 70 °C. The drying time in all cases was controlled to be less than two hours. According to the experimental results, the temperature distribution in the drying chamber was consistent, and the temperature difference between the top and bottom of the chamber was only 1.3 °C. For the energy analysis, it was found that the specific consumption for the drying temperatures of 50, 60, and 70 °C was 450, 256, and 352 kW/kg, respectively. Therefore, the appropriate drying temperature was 60 °C, and the payback time compared to the traditional method was about three months.

Keywords: Energy, Hot air, Drying, Fried cassava chips

1. บทนำ

กระบวนการทำขนมแผ่นมันสำปะหลังทอดที่ผลิตโดยกลุ่มแม่บ้านหมู่ที่ 8 บ้านเขากลอยตก ตำบลท่าข้าม อำเภอกาญจนดิษฐ์ จังหวัดสงขลา ภายใต้โครงการแนวทางการช่วยเหลือเกษตรกร และคนยากจนตามมาตรการเร่งด่วนในการแก้ไขเสริมสร้างความเข้มแข็งอย่างยั่งยืนนั้น พบปัญหาหลักที่ส่งผลกระทบต่อห่วงโซ่อุปทานของกระบวนการทำขนมแผ่นมันสำปะหลังทอดนั้นคือ ขั้นตอนการไล่น้ำมันออกจากผลิตภัณฑ์ขนมแผ่นมันสำปะหลังทอด ซึ่งปัจจุบันชาวบ้านใช้วิธีการนำขนมบรรจุใส่ปิ๊บไว้เป็นเวลาค่าเฉลี่ยประมาณ 12 h จึงจะสามารถนำมาบรรจุใส่แพ็คเกจขายได้ซึ่งนิยามว่าเป็นวิธีการผลิตแบบดั้งเดิม ทำให้ขนมไม่สามารถนำจำหน่ายได้ทันเวลาที่โดยเฉพาะในกรณีที่มียอดจำหน่ายสั่งซื้อในปริมาณมาก กระบวนการบรรจุใส่แพ็คเกจนั้นทำให้มีความล่าช้าเพราะต้องรอเวลาเพื่อให้ขนมแห้งเสี้น้ำมันดีก่อน เพราะน้ำมันจากการทอดนั้นอาจจะทำให้ขนมแผ่นมันสำปะหลังทอดเก็บรักษาไว้ได้ไม่นานเนื่องจากอาจจะมีกลิ่นเหม็นหืนของน้ำมันจากการทอดขนมตกค้างอยู่ แนวทางใน

การแก้ไขคือ การใช้กระบวนการอบลมร้อน (Sabarez, 2021; Zielinska *et al.*, 2019) เพื่อลดระยะเวลาในขั้นตอนการเสเด้น้ำมันในแต่ละครั้งของการผลิตให้น้อยลง สำหรับกระบวนการอบผลิตภัณฑ์อาหารด้วยลมร้อนโดยส่วนใหญ่เป็นการไล่น้ำมันออกจากตัวผลิตภัณฑ์ซึ่งบางครั้งจะเรียกว่ากระบวนการอบแห้ง (Drying process) ซึ่งมีงานวิจัยที่นำมาใช้กับผลิตภัณฑ์อาหาร ดังนี้ Debowski *et al.* (2021) ได้เปรียบเทียบการใช้พลังงานของเครื่องอบเมล็ดพืชแบบต่อเนื่องสองชนิดที่ใช้แก๊สหุงต้ม และถ่านหินอัด โดยใช้แนวทางที่ครอบคลุมในการคำนวณประสิทธิภาพการใช้พลังงาน เสริมด้วยการใช้ไฟฟ้า การวัดการไหล และการควบคุมความชื้นของเมล็ดพืช วิธีนี้อาจมีประโยชน์สำหรับผู้ผลิตที่สามารถใช้ข้อมูลนี้เพื่อสร้างข้อมูลเชื่อถือได้มากขึ้นในแผ่นข้อมูลผลิตภัณฑ์ของตน และยังสามารถควบคุมด้วยกฎหมายให้เป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณการใช้พลังงานของเครื่องอบเมล็ดพืชภาคเกษตรกรรม ตามแนวทางที่นำเสนอในบทความนี้การใช้แก๊สหุงต้มลดลง 6.14% เมื่อเทียบกับเครื่องอบที่ใช้ถ่านหิน Masud *et al.* (2020) ได้พัฒนาระบบอบร้อนโดยอาศัยความร้อนทิ้งมาใช้ในการอบอาหารแบบสัมผัสโดยอ้อมใช้ในการอบมันฝรั่งแผ่น ฟักทองแผ่น แอปเปิ้ลแผ่น แครอทแผ่นและหัวไชเท้าแผ่น ซึ่งควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 60 °C ผลที่ได้พบว่าความร้อนทิ้งสามารถนำมาใช้เป็นพลังทดแทนในกระบวนการอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต่อมา มีการพัฒนาระบบดังกล่าวในเชิงของการใช้แรงดันของ CO₂ ที่สูงแทนการเพิ่มค่าอุณหภูมิในการอบแห้งแผ่นแอปเปิ้ล ระบบอบแห้งดังกล่าวนี้เรียกว่า (Vacuum drying) (Yuan *et al.*, 2020) ซึ่งมีงานวิจัยที่ใช้ระบบแบบเดียวกันนี้ในการอบแห้งมันฝรั่งทอด (Liu *et al.*, 2020) ซึ่งสามารถลดเวลามากกว่า 50% เมื่อเปรียบเทียบกับระบบลมร้อน ถึงกระนั้นค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะยังมีค่าที่สูง เมื่อพิจารณาในแง่เวลาอบแห้งสำหรับกรณีที่มีปริมาณอาหารมีไม่มากและมีค่าความหนาแน่นที่น้อยจะนิยมใช้กระบวนการอบแห้งอาหารด้วยระบบคลื่นไมโครเวฟ (Zielinska *et al.*, 2019; Duan *et al.*, 2020) และมีการพัฒนาต่อยอดใช้ออบอาหารที่มีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นก็คือระบบอบแห้งอาหารด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonics) ซึ่งมุ่งเน้นไปที่การสั่นของโมเลกุลภายในแทนที่การกระตุ้นจากพลังงานความร้อนจากภายนอกนั่นเอง ข้อดีของระบบนี้คือประเด็นด้านสีและการสูญเสียคุณค่าทางอาหาร (Huang *et al.*, 2020) ต่อมา มีการนำประเด็นด้านการวิเคราะห์ทางด้านพลังงานซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมากมารายงานในงานวิจัยของ Menon *et al.* (2020) ได้ใช้ค่าประสิทธิภาพการอบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการพิจารณาระบบอบแห้งในแต่ละรูปแบบ ผลที่ได้บ่งบอกได้ว่าระบบลมร้อนเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่มีค่าความชื้นสูง นอกเหนือจากนี้ มีงานวิจัยที่ Nainggolan *et al.* (2024) ได้สรุปแนวทางการแปรรูปห้วมันสำปะหลังโดยเน้นถึงความสำคัญของการเก็บรักษาและการเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์เนื่องจากห้วมันสำปะหลังมีความชื้นสูงและเน่าเสียง่าย กระบวนการก่อนการอบแห้ง การอบแห้ง และหลังการอบแห้งมีบทบาทสำคัญในการรักษาคุณภาพและการใช้งานของผลิตภัณฑ์มันสำปะหลัง ซึ่งระบบอบแห้งโดยใช้เชื้อเพลิง LPG ยังคงมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงที่สุด เร็ว ๆ นี้มีการศึกษาถึง

การทำให้แห้งของแผ่นมันสำปะหลังแบบหนา โดยมีการประเมินถึงค่าอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านผลิตภัณฑ์ ซึ่งพบว่าค่าอุณหภูมิที่ให้ความประสิทธิภาพทางความร้อนที่ดีที่สุดคือ 90°C ใช้เวลา 180 นาที (3 ชั่วโมง) ด้วยการไหลของ $133\text{m}^3/\text{s}$ ประสิทธิภาพของกลไกการแห้งและอุปกรณ์วัดการไหลมีค่า 70% และ 65% ตามลำดับ ตัวอย่างที่แห้งด้วยเครื่องวัดการไหลยังคงรักษาสีขาวของตัวเอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่มีการเจริญเติบโตของเชื้อรา (Ashaolu *et al.*, 2024)

จากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องที่ผ่านมาการวิเคราะห์ทางด้านพลังงานเป็นสิ่งสำคัญในการนำมาใช้วัดระบบการอบแห้ง และเมื่อพิจารณาถึงการใช้ค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการอบแห้งแผ่นมันสำปะหลังทอดนั้นยังไม่มีมีการรายงานถึงเรื่องนี้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของค่าอุณหภูมิการอบแห้งที่มีต่อค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ หลังจากนั้นนำค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมไปใช้ในการวิเคราะห์หาระยะคืนทุนโดยเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิม โดยระบบการอบแห้งที่ใช้จะเป็นเครื่องอบแห้งระบบลมร้อนอาศัยพลังงานความร้อนจากแก๊สอินฟราเรดเนื่องจากต้องการให้ระบบสอดคล้องกับแหล่งพลังงานเดิมของกระบวนการทอด ในการวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในครั้งนี้ พร้อมทั้งประเมินผลทางด้านเศรษฐศาสตร์เพื่อเป็นแนวทางให้กลุ่มผู้ผลิตแผ่นมันสำปะหลังทอดได้นำความรู้ไปใช้ในการประหยัดพลังงานในขั้นตอนการผลิตต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาเงื่อนไขค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอบไล่ไอน้ำมันสำปะหลังทอด

2.2 เพื่อวิเคราะห์วิเคราะห์พลังงานและเศรษฐศาสตร์ของระบบการอบลมร้อนสำหรับมันสำปะหลังทอด

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัตถุดิบ

มันสำปะหลังทอดทอดที่ใช้ในงานวิจัยมาจากกลุ่มแม่บ้านหมู่ที่ 8 บ้านเขากลอยตก ตำบลท่าข้าม อำเภอกาญจนดิษฐ์ จังหวัดสุราษฎร์ธานี มีความหนาประมาณ 1.5 mm โดยแผ่นมันสำปะหลังแผ่นมีความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 100 (%d.b.) และอบจนกระทั่งตัวอย่างเหลือความชื้นสุดท้ายไม่เกินร้อยละ 25 (%d.b.) ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายวิเคราะห์ตามวิธี AOAC (1995) 934.06 (Association of official analytical chemists official, 1995) การอบแห้งตัวอย่างแต่ละครั้งใช้ปริมาณ 5 kg สำหรับอัตราส่วนความชื้นฐานแห้งของแผ่นมันสำปะหลังทอด (Moisture content; MC) หาได้จากสมการที่ (1) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงแนวโน้มการแห้งตัวของตัวอย่างการอบแห้งแผ่นมันสำปะหลังทอดในแต่ละกรณีศึกษา

$$MC = \frac{M_w}{M_d} \times 100 \quad (1)$$

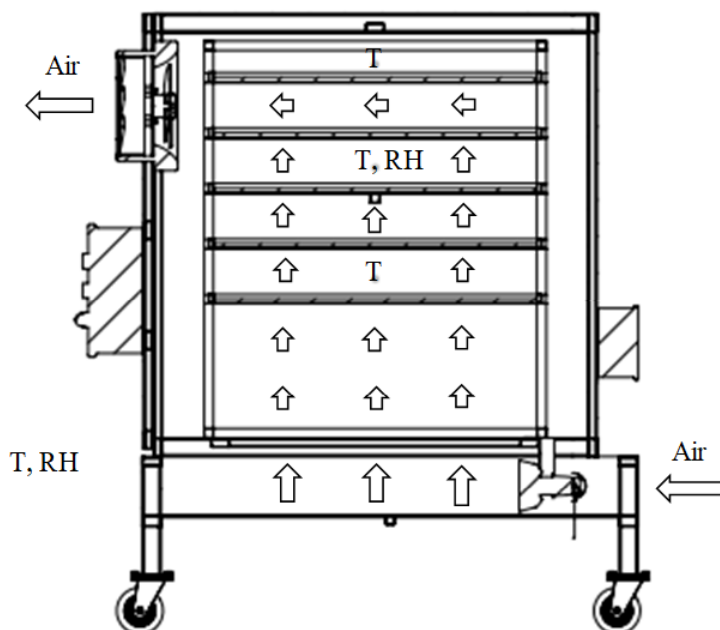
โดยที่ M_w คือ มวลของน้ำในปริมาตรที่พิจารณา (kg) และ M_d คือ มวลของของแข็งในปริมาตรที่พิจารณา (kg)

3.2 การติดตั้งการทดลอง

การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบใช้เตาแก๊สอินฟราเรด ตัวเครื่องต้องใช้เตาแก๊สอินฟราเรดร่วมแก๊สทุ้งต้มเป็นตัวให้ความร้อน ในการอบขนมแผ่นมันสำปะหลังทอด โดยใช้พัดลมดูดอากาศเป็นตัวหมุนเวียนอากาศภายในเครื่องอบแห้ง เนื่องจากเครื่องอบแห้งต้องใช้พลังงานความร้อนจากแก๊สทุ้งต้มร่วมกับเตาแก๊สอินฟราเรด รุ่น Infrared burner K-1602 เครื่องอบแห้งมีรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $120 \times 120 \times 120$ cm สำหรับบรรจุมันสำปะหลังทอดทอดได้ 5 kg ผนังเครื่องอบจะใช้แผ่นอะลูมิเนียมพร้อมหุ้มฉนวนกันความร้อน มีความหนา 75 mm ซึ่งแสดงดังภาพที่ 1 ภายในตู้อบจะมีการสร้างแผ่นกันอากาศร้อนที่เจาะรู เพื่อให้อากาศนำความร้อนจากหัวเผามาไหลผ่านไปยังห้องอบแห้งและระบายความชื้นของผลิตภัณฑ์ออกทางด้านบนด้วยพัดลมดูดอากาศที่มีขนาด 22.86 cm ซึ่งวัดค่าความเร็วลมได้ค่าประมาณ 4 m/s ดังแสดงดังภาพที่ 2 ในการจุ่มระบบเผาไหม้นั้นจะใช้ตู้ควบคุมแก๊สอินฟราเรดเปิด-ปิด ชุดโซลินอยล์จะอยู่ด้านล่างตู้อบแห้งเป็นตัวควบคุมระบบ และถึงแก๊สจะติดตั้งอยู่ด้านหลังของตู้อบแห้ง



ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งเตาแก๊สอินฟราเรด



ภาพที่ 2 ลักษณะการไหลของอากาศร้อนผ่านแผ่นมันสำปะหลังทอด

ค่าความไม่แน่นอนของการทดลองนี้ประกอบด้วย 1) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ซึ่งต่อกับชุดเก็บข้อมูล รุ่น Yokogawa Fx100 ซึ่งให้ค่าความคลื่อนในการวัดคือ $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 2) ค่าความชื้นสัมพัทธ์จะใช้เซ็นเซอร์รุ่น Primus HM005 ซึ่งให้ค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 1\%\text{RH}$ 3) การชั่งน้ำหนักของขนมแผ่นมันสำปะหลังทอดจะใช้เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลยี่ห้อ Ohaus รุ่น R21PE30 (Ranger 2000) พิกัด 0-30 kg ซึ่งมีค่าอยู่ที่ $\pm 2\%\text{kg}$

ขั้นตอนการทดลองของการศึกษาค่าผลกระทบของค่าอุณหภูมิที่มีต่อค่าสมรรถนะทางพลังงาน มีดังนี้ 1) นำเครื่องอบแห้งไว้ในพื้นที่ที่จัดเตรียมไว้ ติดตั้งชุดเซ็นเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์ในเครื่องอบแห้ง โดยนำเซ็นเซอร์วัดความชื้นวางไว้ในตำแหน่งตรงกลางของถาดที่ 3 และอีกตัวอยู่ข้างนอกเครื่องอบแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 2 2) ติดตั้งอุปกรณ์บันทึกค่าอุณหภูมิติดตั้งอุปกรณ์บันทึกค่าอุณหภูมิ นำขนมทั้งหมดมาชั่งน้ำหนักก่อนเข้าเครื่องอบจำนวน 5 กิโลกรัม 3) นำกระดาษซับมันและขนมแผ่นมันสำปะหลังทอดจัดเรียงลงในถาดอะลูมิเนียมทั้งหมด 5 ชั้นโดยเว้นช่องว่างตรงกลางเพื่อให้เกิดการไหลผ่านของอากาศในแต่ละชั้นและให้เกิดการไหลเวียนของอากาศครอบคลุมทั้งห้องอบแห้ง 4) เริ่มทำการทดลองใช้แก๊สอินฟราเรดในการควบคุมอุณหภูมิห้องอบ ในการทดลองจะปรับเปลี่ยนค่าอุณหภูมิในการอบแห้ง 3 ค่าได้แก่ 50 60 และ 70 $^{\circ}\text{C}$ โดยทุกกรณีใช้เวลาในการอบแห้ง 3 h ตั้งแต่เวลา 9.00 ถึง 12.00 น. 5) ทำการตรวจสอบสีของขนมที่วางอยู่บนถาดว่าได้ลักษณะใกล้เคียงกับที่มี

ขายตามท้องตลาดและบันทึกช่วงเวลาที่สีใกล้เคียงกันของแต่ละค่าอุณหภูมิทุกการทดลองจะต้องทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ซ้ำ เพื่อความแม่นยำทางด้านสถิติ

สำหรับการประเมินทางคุณภาพ ในงานวิจัยนี้จะใช้การทดสอบคุณภาพด้านสีของแผ่นมันสำปะหลังทอดหลังผ่านการอบแห้งวัดโดยใช้เครื่อง Spectrophotometer (Hunter Lab, Color Flex, UK) และใช้ระบบสีเป็นแบบ CIE L^* , a^* and b^* โดยค่า L^* คือ ความสว่างของวัตถุ (0 ดำ, 100 ขาว) a^* คือ ค่าสีแดง/เขียว (+ แดง, - เขียว) และค่า b^* คือ ค่าสีเหลือง/น้ำเงิน (+ เหลือง, - น้ำเงิน) ก่อนการวัดสีของตัวอย่างอบแห้งต้องสอบเทียบกับแผ่นสีมาตรฐานทั้งแผ่นสีดำและแผ่นสีขาว

3.3 การวิเคราะห์ทางพลังงานและเศรษฐศาสตร์

ความสิ้นเปลืองทางพลังงานเป็นสิ่งที่สะท้อนไปถึงการนำเครื่องอบแห้งไปใช้งานจริง กระบวนการวิเคราะห์ทางด้านพลังงานในงานวิจัยนี้เริ่มจากการคำนวณความชื้นในวัสดุที่ระเหยในระหว่างกระบวนการอบแห้งคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$m_{out} = m_i - m_f \quad (2)$$

โดยที่ m_{out} คือ ความชื้นที่ออกจากวัสดุในระหว่างกระบวนการอบแห้ง m_i คือ มวลของวัสดุก่อนกระบวนการอบแห้ง และ m_f คือ มวลของวัสดุหลังกระบวนการอบแห้ง พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในระบบอบแห้งคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$E_t = (m_{fuel} C_{fuel})t \quad (3)$$

โดยที่ E_t คือ พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในระบบอบแห้ง m_{fuel} คือ มวลเชื้อเพลิง C_{fuel} คือ ค่าความร้อนเชื้อเพลิง และ t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) เป็นอัตราส่วนของพลังงานที่ใช้ในระบบอบแห้งต่อความชื้นที่ระเหยออกจากวัสดุในระหว่างกระบวนการอบแห้ง (Menon *et al.*, 2020) คำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$SEC = \frac{E_t}{m_{out}} \quad (4)$$

นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เป็นสิ่งที่สำคัญในการออกแบบระบบบอบแห้ง ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ระยะเวลาคื่นทุน (PP) เป็นตัวชี้วัด ระยะเวลาคื่นทุนจะขึ้นอยู่กับค่าใช้จ่ายในการลงทุน และผลกำไรซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (5)

$$PP = \frac{CC}{PR} \quad (5)$$

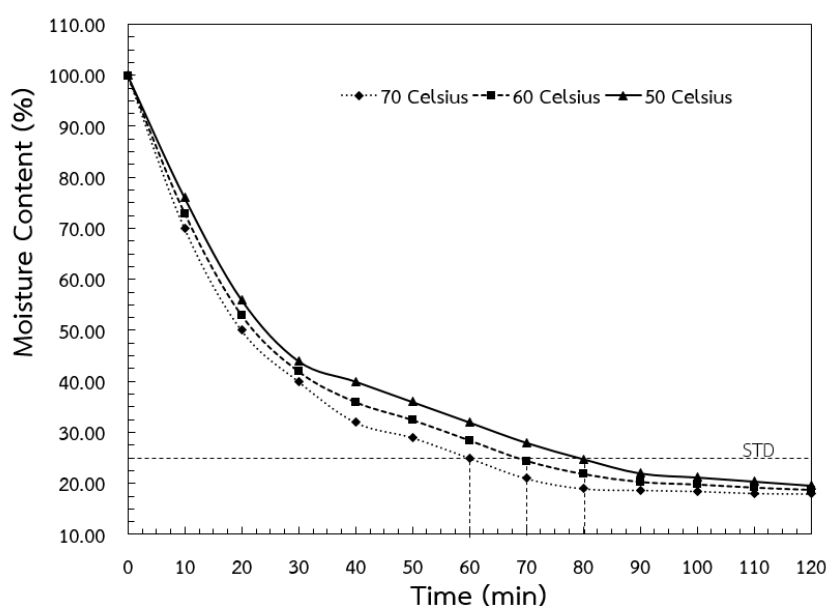
โดยที่ CC คือ ค่าใช้จ่ายในการลงทุนซึ่งประกอบไปด้วย ค่าวัสดุและค่าจ้างสร้าง PR คือ กำไรจากการขายสินค้าหรือผลิตภัณฑ์

4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

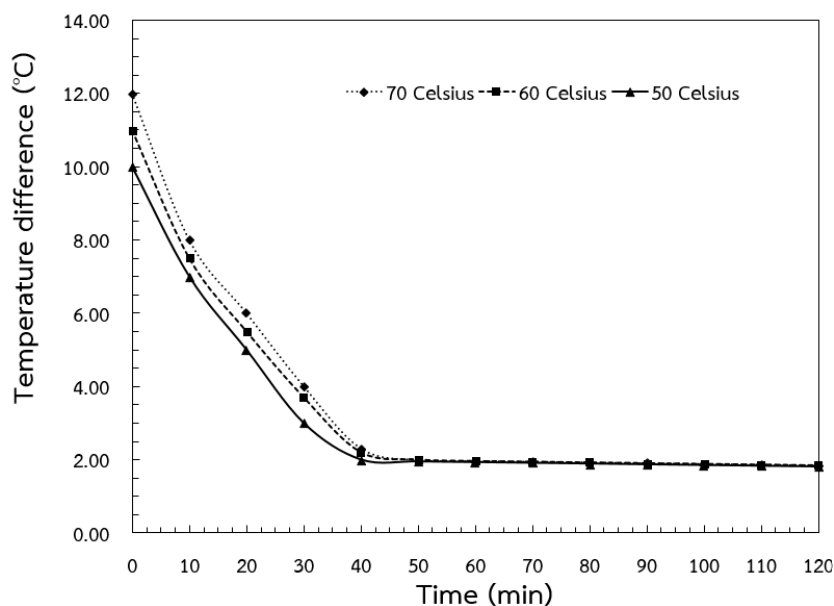
ในการวิเคราะห์ทางด้านพลังงานเริ่มจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนความชื้นที่ตามเวลาการอบแห้งของแต่ละค่าอุณหภูมิควบคุมดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งผลที่ได้พบว่าค่าอัตราส่วนความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 30 min หลังจากนั้นในช่วงเวลา 40 จนถึง 90 min ค่าความชื้นของค่าอัตราส่วนความชื้น จะมีค่าลดลง และจะเข้าสู่สภาวะสมดุลในช่วงหลังจาก 90 จนถึง 120 min เนื่องจากการเข้าสู่ความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์ (Sabarez, 2021) ผลจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนความชื้นที่เข้าสู่ค่ามาตรฐานของผลิตภัณฑ์ (25 %d.b.) ตามเวลาการอบแห้ง ซึ่งสามารถบ่งชี้ถึงระยะเวลาในการอบแห้งของค่าอุณหภูมิควบคุม 50 60 และ 70 °C คือ 40 50 และ 60 min ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวก็สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Sabarez, 2021; Debowski *et al.* 2021; Menon *et al.* 2020) โดยงานวิจัยที่ 3 ได้บ่งบอกว่าระยะเวลาการอบแห้งจะแปรผกผันกับค่าอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามค่าอุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้ลายการการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ซึ่งสามารถตรวจสอบได้การกระบวนกรวัดสีของผลิตภัณฑ์ ในประเด็นค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มค่าอัตราการอบแห้ง เหตุผลที่จะนำมาใช้อธิบายทางกายภาพสามารถศึกษาได้จาก การประเมินผลต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านบนและล่างของห้องอบแห้งในแต่ละค่าอุณหภูมิควบคุม ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4 พบว่าประเมินผลต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านบนและล่างของห้องอบแห้งจะลดลงเมื่อเวลาอบแห้งมากขึ้นเนื่องจากเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) ซึ่งสภาวะคงตัวจะเริ่มที่เวลาการอบแห้ง 40 min โดยสามารถสรุปได้ว่าการกระจายตัวของค่าอุณหภูมิทั้งห้องอบแห้งนั้นจะสม่ำเสมอเมื่ออบแห้งมาจนถึง 40 min นั้นเอง โดยค่าผลต่างเฉลี่ยมากที่สุดอยู่ที่การเลือกใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่ 70 °C และค่าผลต่างเฉลี่ยน้อยสุดอยู่ที่อุณหภูมิในการอบแห้งที่ 50 °C

เมื่อพิจารณาผลต่างของค่าความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างด้านทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้ง ในแต่ละค่าอุณหภูมิควบคุมจะแสดงในภาพที่ 5 ซึ่งพบว่าผลต่างของค่าความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างด้าน

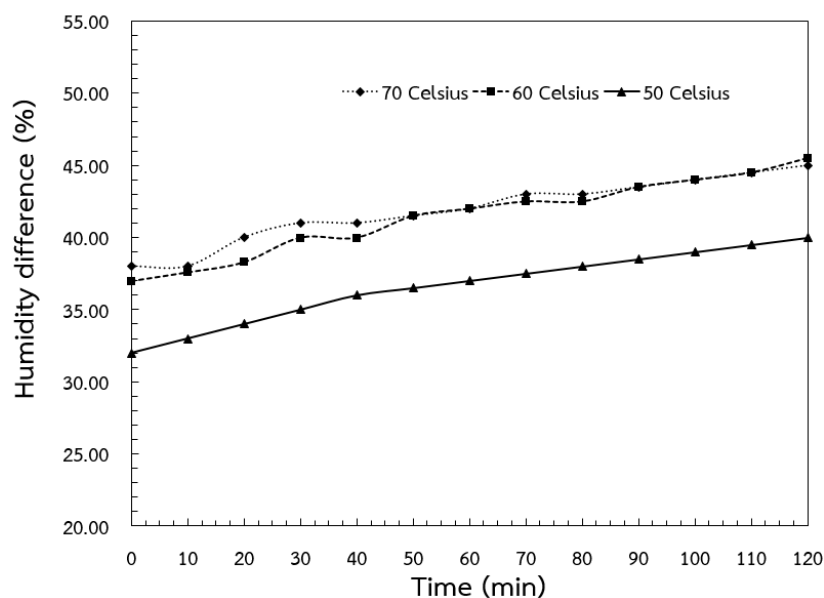
ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น มองอีกนัยหนึ่งคือ ความชื้นของน้ำมันจากแผ่นมันสำปะหลังทอดถูกนำพาออกไปโดยอากาศร้อนที่พัดผ่านพื้นผิวของขนมแผ่นมันสำปะหลังทอดนั่นเอง เมื่อผลต่างของค่าความชื้นเพิ่มขึ้นจะสะท้อนไปยังน้ำหนักของแผ่นมันสำปะหลังทอดที่กำลังลดลงเช่นกัน โดยค่าผลต่างเฉลี่ยมากที่สุดอยู่ที่การเลือกใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่ 70 °C และค่าผลต่างเฉลี่ยน้อยสุดอยู่ที่อุณหภูมิในการอบแห้งที่ 50 °C อย่างไรก็ตามค่าผลต่างของความชื้นสัมพัทธ์ของการเลือกใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่ 60 °C และ 70 °C แทบจะไม่ได้ต่างกันตั้งแต่เวลาในการอบแห้ง 60 min เป็นต้นไป ซึ่งประเด็นดังกล่าวนี้ต้องมีการพิจารณาเพิ่มเติมในการหาอัตราส่วนความชื้นของแผ่นมันสำปะหลังทอดและนำค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมาวิเคราะห์ระบบอบแห้ง โดยประเด็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องอบแห้งนั้นมีการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบแปรผกผันตรงกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Ashaolu *et al.*, 2024) ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นจะไปนำพาให้ปริมาณน้ำมันและไอน้ำที่ผิวของผลิตภัณฑ์ออกไปสู่บรรยากาศ จึงส่งผลให้ความชื้นที่อยู่ภายในผลิตภัณฑ์จะเข้ามาแทนที่ตรงบริเวณผิวผลิตภัณฑ์เพื่อรักษาสมดุลทางความชื้น



ภาพที่ 3 ค่าอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในแต่ละค่าอุณหภูมิควบคุม



ภาพที่ 4 ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านบนและล่างของห้องอบแห้งในแต่ละค่าอุณหภูมิควบคุม

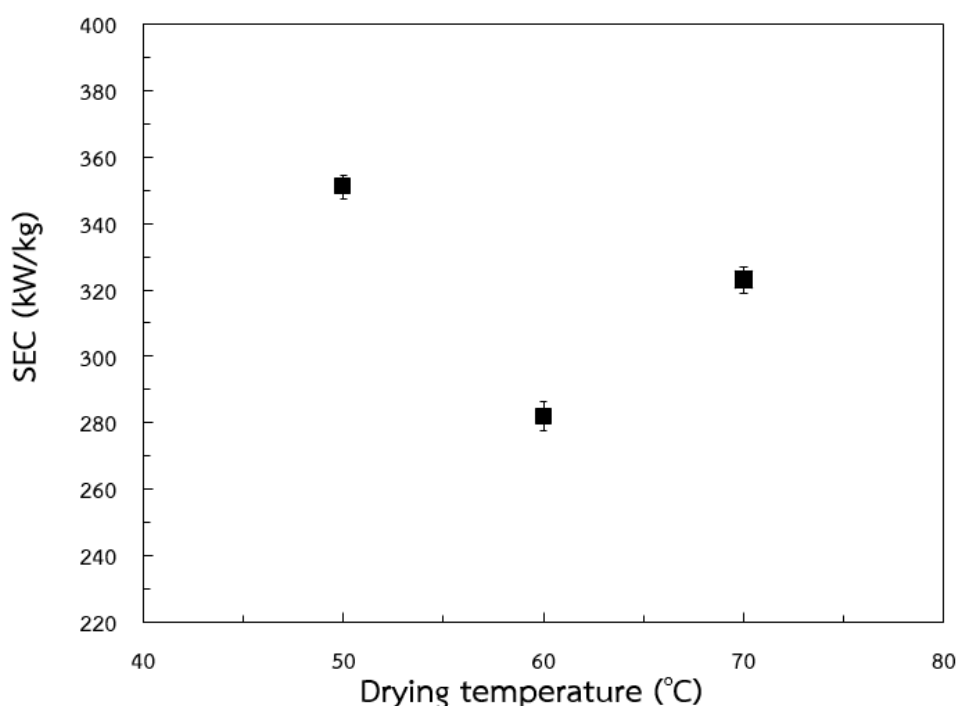


ภาพที่ 5 ผลต่างของค่าความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างด้านทางเข้าและทางออก
ของห้องอบแห้งในแต่ละค่าอุณหภูมิควบคุม

ผลของค่าอุณหภูมิอบแห้งต่อค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะแสดงดังภาพที่ 6 ซึ่งพบว่า ค่าความสิ้นเปลืองจำเพาะของกรณีที่ใช้ค่าอุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C มีค่า 351 282 และ 323 kW/kg ตามลำดับ ผลที่ได้นี้บ่งบอกให้ทราบว่า กรณีใช้อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C สามารถประหยัดพลังงาน

ได้มากที่สุด ถึงแม้ว่าในการวิเคราะห์ประเด็นการกระจายตัวสม่ำเสมอของค่าอุณหภูมิทั้งห้องและค่าความสามารถในการไล่น้ำมันออกจากแผ่นมันสำปะหลังทอดจะไม่ได้บ่งชี้ไปถึงการเลือกค่าอุณหภูมินี้ก็ตาม เหตุผลที่ค่าอุณหภูมิดังกล่าวนี้นี้สามารถให้ค่า SEC น้อยที่สุดนั้นมาจากค่า m_{out} ที่ซึ่งมีค่ามากที่สุดอยู่ที่ 0.10 kg ขณะที่ค่า m_{out} ของค่าอุณหภูมิมอบแห้ง 50 °C และ 70 °C มีค่า 0.05 kg และ 0.08 kg ตามลำดับ นอกจากนี้ปริมาณการใช้พลังงานจากแก๊สหุงต้มของกรณีค่าอุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C มีค่า 1.2 1.5 และ 2.0 kg ตามลำดับ ซึ่งปริมาณการใช้พลังงานจากแก๊สหุงต้มของค่าอุณหภูมิมอบแห้ง 60 °C มีค่าแตกต่างจากกรณีค่าอุณหภูมิมอบแห้ง 50 °C เพียงแค่ 0.3 kg

เมื่อพิจารณาค่า SEC ของการอบแห้งผลิตภัณฑ์แผ่นทางการเกษตร ของงานวิจัยที่ผ่านมา (Yuan *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2020) พบว่าค่า SEC มีค่าสูงกว่าประมาณ 20 % เนื่องจาก ระบบการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เข้ามาช่วยในการอบแห้งสำหรับระบบการอบแห้งแบบผสม (Hybrid dryer) สามารถลดการใช้พลังงานลงได้ อย่างไรก็ตามระยะเวลาในการอบแห้งจะมีค่าสูงกว่าของงานวิจัยนี้เช่นกัน เนื่องจากการมีเสถียรภาพและศักยภาพของการใช้พลังงานอย่างต่อเนื่องของระบบเตาแก๊สอินฟราเรดจะส่งผลต่อการเพิ่มผลผลิตและการควบคุมคุณภาพของการผลิต



ภาพที่ 6 ผลของค่าอุณหภูมิมอบแห้งต่อค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

เมื่อพิจารณาสีของแผ่นมันสำปะหลังทอดทั้งสามค่าอุณหภูมิอบแห้งพบว่า สีของแผ่นมันสำปะหลังทอดมีความสว่าง (L^*) อยู่ที่ 51 และมีค่าสีเขียว ($-a^*$) อยู่ที่ 49 ค่าสีเหลือง ($+b^*$) อยู่ที่ 48 ซึ่งมากกว่าสีแผ่นมันสำปะหลังทอดจากผลิตภัณฑ์ทางการค้าเพียงเล็กน้อย ซึ่งมีค่าต่างกันเพียง 7% เนื่องจากกระบวนการอบแห้งผ่านความร้อนจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลขึ้น อย่างไรก็ตามของแผ่นมันสำปะหลังทอดทั้งสามค่าอุณหภูมิอบแห้งยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ทางวิสาหกิจชุมชนใช้ในการค้าขายดังแสดงในภาพที่ 7 ดังนั้นในการเลือกค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งจึงพิจารณาเพียงประเด็นด้านการใช้พลังงาน ซึ่งพบว่าค่าอุณหภูมิอบแห้งที่ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีความเหมาะสมที่สุดเนื่องจากประหยัดพลังงานมากที่สุด โดยให้ค่า SEC อยู่ที่ 282 kW/kg



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 7 การเปรียบเทียบสีขนมแต่ละอุณหภูมิ: (ก) $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, (ข) $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, (ค) $70\text{ }^{\circ}\text{C}$

จากผลการวิเคราะห์ทางด้านพลังงานที่ผ่านมา ข้อมูลการอบแห้งของค่าอุณหภูมิอบแห้งที่ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะถูกนำมาทำการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์โดยใช้ระยะคืนทุนเป็นตัวชี้วัดและเปรียบเทียบข้อมูลกับกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิมที่ใช้การบรรจุแผ่นมันสำปะหลังทอดหลังจากการทอดพร้อมกระดาษซับมันในภาชนะปิดสุญญากาศ ซึ่งต้องใช้เวลาดูดซับความชื้นถึง 12 h ผลการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเงื่อนไขการอบแห้งที่ค่าอุณหภูมิ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งผลที่ได้พบว่า ระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 3 month เมื่อพิจารณาที่เงื่อนไขควบคุม ราคาขายแผ่นมันสำปะหลังทอด 150 THB/kg ค่าจ้างพนักงาน 300 THB /day และวันทำงาน 180 day/year อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวยังคงต้องได้รับการพิสูจน์เพิ่มเติมในของการทำงานระยะยาวต่อไป



ตารางที่ 1 ข้อมูลการรอบแท่งสำหรับการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

พารามิเตอร์	เครื่องอบ	ดั้งเดิม
น้ำหนักเริ่มต้นแผ่นมันสำปะหลังทอด (kg)	5.00	5.00
น้ำหนักสุดท้ายแผ่นมันสำปะหลังทอด (kg)	2.55	2.55
เวลาในการอบ (h)	1	12
ราคาอุปกรณ์และเครื่องมือในการอบแท่ง (THB)	25,000	3,000
ค่าเชื้อเพลิง (THB)	60	-
ค่าซ่อมบำรุง (%)	5	-
ค่าเสื่อมสภาพ (%)	10	-
ระยะเวลาคืนทุน (month)	3	-

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบค่าอุณหภูมิการอบแท่งที่มีต่อค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เพื่อจะหาค่าอุณหภูมิอบแท่งที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานอบแท่งแผ่นมันสำปะหลังทอดในแง่ของงานด้านประหยัดพลังงาน ซึ่งในการทดลองจะทำการแปรเปลี่ยนค่าอุณหภูมิ 3 ค่าได้แก่ 50, 60 และ 70 °C ซึ่งผลการทดลองบ่งชี้ถึงการหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมโดยพิจารณาจาก ค่าอัตราส่วนความชื้น ค่าผลต่างของอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ สีของผลิตภัณฑ์ และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ผลที่ได้พบว่าค่าอุณหภูมิ 60 °C ให้ค่าเหมาะสมที่สุดเนื่องจากให้ผลต่างค่าความชื้นในอากาศที่สูง และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุดเนื่องจากสามารถไล่น้ำมันออกจากแผ่นมันสำปะหลังทอดได้สูงในขณะที่การใช้พลังงานความร้อนจากแก๊สหุงต้มน้อย หลังจากนั้นนำผลการทดลองนี้ไปเปรียบเทียบกับกระบวนการไล่น้ำมันแบบดั้งเดิม ซึ่งผลการคำนวณค่าระยะคืนทุนอยู่ที่ 3 เดือน ซึ่งแสดงถึงความคุ้มค่าในด้านการลงทุนของงานวิจัย

6. กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี)

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental fund; FF) ปี พ.ศ.2566 สัญญาเลขที่ FRB660020/0172 และได้รับการสนับสนุนจาก สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

7. เอกสารอ้างอิง

- Ashaolu, M.O., Kolapo, F., Lamidi, S., & Oluchukwu, A. (2024). Design and Performance Evaluation of an Air Flow Meter for Drying Cassava Chips. **Saudi Journal of Engineering and Technology**, 9(2), 44-50. DOI: 10.36348/sjet.2024.v09i02.003
- Association of Official Analytical Chemists Official. (1995). **Methods of Analysis of the AOAC International** (16th ed.). Gaithersburg, MD: [n.p.].
- Debowski, M., Bukowski, P., Kobel, P., Bieniek, J., Romanski, L., & Knutel, B. (2021). Comparison of Energy Consumption of Cereal Grain Dryer Powered by LPG and Hard Coal in Polish Conditions. **Energies**. 14(14), 4340. DOI: 10.3390/en14144340
- Duan, L., Duan, X., & Ren, G. (2020). Structural characteristics and texture during the microwave freeze drying process of Chinese yam chips. **Drying Technology**. 38(7), 1-12. DOI: 10.1080/07373937.2019.1600142
- Huang, D. Men, K., Li, D., Wen, T., Gong, Z., Sunden, B., & Wu, Z. (2020). Application of ultrasound technology in the drying of food products. **Ultrasonics – Sonochemistry**, 63, 104950. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.104950
- Liu, C., Grimi, N., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2020). Impacts of preliminary vacuum drying and pulsed electric field treatment on characteristics of fried potatoes. **Journal of Food Engineering**. 276, 109898. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2019.109898
- Masud, M.H., Ananno, A.A., Ahmed, N., Dabnichki, P., & Salehin, K.N. (2020). Experimental investigation of a novel waste heat based food drying system. **Journal of Food Engineering**. 281, 110002. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110002
- Menon, A., Stojcesk, V., & Tassou, S.A. (2020). A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies. **Trends in Food Science & Technology**. 100, 67–76. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.03.014
- Nainggolan, E.A., Banout, J., & Urbanova, K. Recent Trends in the Pre-Drying, Drying, and Post-Drying Processes for Cassava Tuber: A Review. **Foods**. 2024; 13(11), 1778. DOI: 10.3390/foods13111778

- Sabarez, H., (2021). Advanced Drying Technologies of Relevance in the Food Industry. **Innovative Food Processing Technologies**, 64-81. DOI: 10.1016/B978-0-08-100596-5.23042-4
- Yuan, Y., Zhao, Z., Wang, L., Xu, Y., Chen, H., Kong, L., & Wang, D. (2020). Process optimization of CO₂ high-pressure and low-temperature explosion puffing drying for apple chips using response surface methodology. **Drying Technology**. 40(1), 100-115. DOI: 10.1080/07373937.2020.1771361
- Zielinska, M., Ropelewska, E., Xiao, H.W., Mujumdar, A.S., & Law, C.L. (2019). Review of recent applications and research progress in hybrid and combined microwave assisted drying of food products: Quality properties. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**. 60(13), 1-53. DOI: 10.1080/10408398.2019.1632788