



การพัฒนาวิธีทำมะพร้าวคั่วโดยใช้ลมร้อนร่วมกับไซโคลน

Development of Roasted Coconut Production Method using Hot Air with Drying Cyclone

นิโอะ ปูซู^{1*}, อิบรอเอ็ง ปิยา¹, วสันต์ พลาสัย¹, สับรี สะนอ¹

Ni-oh Puzu^{1*}, Ibroheng Piya¹, Wasan Palasai¹, Sabree Sanor¹

(Received: December 31, 2019; Revised: March 8, 2020; Accepted: April 9, 2020)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาวิธีทำมะพร้าวคั่วโดยใช้ลมร้อนร่วมกับไซโคลน ที่สามารถพัฒนาให้เป็นกระบวนการผลิตที่ต่อเนื่องได้ง่าย ในขณะที่วิธีการคั่วมะพร้าวในกระทะแบบปัจจุบันทำได้ยาก การศึกษาการคั่วมะพร้าวจะใช้ชุดทดลองที่ออกแบบและสร้างขึ้นเองโดยใช้โบลเวอร์เป็นแหล่งกำเนิดลมและฮีตเตอร์ไฟฟ้าเป็นแหล่งความร้อน การทดลองได้ทำการป้อนมะพร้าวชุดฝอยแบบต่อเนื่องโดยตัวป้อนแบบสกรูด้วยอัตรา 200 g/min และทำการป้อนซ้ำจำนวน 15 รอบ อุณหภูมิลมร้อนที่ศึกษาเท่ากับ 70 80 และ 90 °C ความเร็วลมก่อนเข้าไซโคลนเท่ากับ 25.7 32.0 และ 38.0 m/s ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนสามารถลดจำนวนรอบในการป้อนซ้ำได้ดีกว่าการเพิ่มความเร็วลม กรณีอุณหภูมิ 90 °C ความเร็วลม 38.0 m/s มีอัตราการลดลงของความชื้นสูงสุดโดยมะพร้าวจากการป้อนรอบที่ 8 จะมีความชื้นคงเหลือน้อยกว่า 0.66%db ก่อนที่ความชื้นคงเหลือจะมีแนวโน้มคงที่ ดังนั้นวิธีผลิตมะพร้าวคั่วโดยใช้ลมร้อนร่วมกับไซโคลนมีศักยภาพที่จะพัฒนาให้เป็นการผลิตแบบต่อเนื่องเพื่อใช้งานจริงทดแทนการผลิตแบบคั่วในภาชนะ

คำสำคัญ: มะพร้าวคั่ว แปรรูปมะพร้าว อบแห้ง ไซโคลนอบแห้ง

Abstract

This research proposed the production development of roasted coconut process using hot air together with cyclone as a continuous production process instead of the conventional production method, which roasted by hot pan. The experiment was conducted from designing and fabricating process system, which employed centrifugal blower to generate air flow and electric heaters as a heat source.

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

¹Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University

*Corresponding Author: niohpuzu@gmail.com



Continuous feeding rate of fresh coconut was maintained at 200 g/min and 15 rounds. Air temperatures at 70, 80, and 90 °C and air velocities at 25.7, 32.0, and 38.0 m/s were investigated. The results found that increasing air temperature had more influence on decreasing the rounds feeding than that increasing air velocity factor. For temperature at 90 °C and velocity at 38.0 m/s, drying rate was the highest. This showed that the moisture content was lower than 0.66%db after finishing the 8th round of feeding before becoming constant moisture state. The results can be developed the method which employed hot air and cyclone for roasting coconut as continuous production instead the convention method.

Keywords: Roasted coconut, Processed coconut, Drying, Cyclone dryer

บทนำ

จากการสำรวจข้อมูลของผู้ประกอบการวิสาหกิจชุมชนที่ผลิตผลิตภัณฑ์มะพร้าวคั่วและมีมะพร้าวคั่วเป็นส่วนประกอบสำคัญ พบว่ามีสถานประกอบการหลายแห่งในพื้นที่จังหวัดนราธิวาส ปัตตานีและยะลา ที่ผลิตสินค้าหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ (One Tambol, One Product หรือ OTOP) ผลิตภัณฑ์มะพร้าวคั่วเป็นแหล่งรายได้ทางหนึ่งในท้องถิ่นที่สามารถยกระดับคุณภาพชีวิตของชุมชนอย่างเป็นรูปธรรม แต่อย่างไรก็ตาม การดำเนินการของชุมชนที่ยังใช้กระบวนการผลิตจากภูมิปัญญาท้องถิ่นเป็นหลัก ดังนั้นการพัฒนาสินค้าหรือกระบวนการผลิตให้สามารถแข่งขันได้ในตลาดระดับประเทศ หรือต่างประเทศจึงเป็นประเด็นที่ท้าทาย

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับแปรรูปมะพร้าวคั่วผลอยให้เป็นมะพร้าวคั่วเนื่องจากมีแนวคิดที่จะพัฒนาวิธีการผลิตแบบคั่วในภาชนะที่ใช้ในปัจจุบัน จากผลการทบทวนเอกสารเกี่ยวกับข้อมูลของการพัฒนาการผลิตมะพร้าวคั่วโดยตรงนั้นพบว่ามีน้อย สาเหตุอาจจะเป็นเพราะมะพร้าวคั่วเป็นผลิตภัณฑ์ที่แปรรูปและบริโภคในระดับท้องถิ่น แต่จากการศึกษาผลกำไรจากผลิตภัณฑ์มะพร้าวคั่วของสถานประกอบการวิสาหกิจชุมชนพบว่าสินค้าที่สมควรพัฒนาเพื่อเพิ่มมูลค่าในอนาคตเนื่องจากมีศักยภาพที่จะเป็นแหล่งรายได้ที่สำคัญในชุมชน ดังนั้นควรขยายโอกาสทางธุรกิจหรือยกระดับเป็นธุรกิจขนาดย่อม หรือ Small and Medium Enterprise (SMEs) ที่มีการจัดการผลิตที่มากขึ้น (Petpradub, 2018) แต่จากการวิเคราะห์กระบวนการผลิตพบว่าข้อจำกัดเนื่องจากการคั่วในภาชนะไม่สามารถทำการคั่วแบบต่อเนื่องได้

เนื่องจากการศึกษาวิธีทำมะพร้าวคั่วโดยใช้ลมร้อนร่วมกับไซโคลนโดยตรงยังจำกัด การทบทวนเอกสารจึงอาศัยผลการศึกษาที่ใกล้เคียงสำหรับการประยุกต์เพื่อพัฒนากระบวนการคั่วโดยใช้



ลมร้อนร่วมกับไซโคลน โดย Phosee, Khongbutr, Uttamating, & Assawarachan (2013) ได้ศึกษาโดยการทดลองอบแห้งใบสาระแนด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 55 °C และ 75 °C จากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 55 °C สามารถรักษาค่าสีของใบสาระแนได้เหมาะสมที่สุด แต่ที่อุณหภูมิ 75 °C ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่ากรณีอุณหภูมิ 55 °C ถึง 3 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนสามารถลดเวลาการอบแห้งได้มาก และ Pintana, Thanompongchart, Phimphilai, & Tippayawong (2016) ได้ศึกษาอบข้าวเกรียบข้าวด้วยวิธีการจ่ายลมร้อนเข้าไปในตู้อบ อุณหภูมิของลมที่ศึกษาที่ 40, 50 และ 60 °C ความเร็วลม 0.5 1.0 และ 1.5 m/s ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิและความเร็วลมส่งผลต่อเวลาในการอบแห้ง การลดลงของความชื้นในช่วงเริ่มต้นการอบแห้งจะสูงและค่อย ๆ ลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น พฤติกรรมการลดลงของความชื้นเป็นไปตามลักษณะสมการพหุนามยกกำลังสอง นอกจากนี้ Wisaiprom, Kadsayapanand, & Palasai (2018) ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการอบแห้งกึ่งด้วยระบบการอบแห้งด้วยอากาศที่มีชื้นสัมพัทธ์ต่ำโดยอยู่ในช่วง 35-55% Rh อุณหภูมิในการอบแห้ง 40, 50 และ 60 °C ผลการทดลองพบว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่ใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 60 °C จะใช้เวลาอบแห้งน้อยที่สุดซึ่งเท่ากับ 150 นาที โดยความชื้นสุดท้ายของกึ่งเท่ากับ 13.51%db

Grimm et al. (2017) ได้ศึกษาการแห้งของเส้นใยกระดาษโดยใช้เครื่องอบแห้งดันแบบที่ใช้ลมร้อนร่วมกับไซโคลนเพื่อพัฒนาใช้โรงงานผลิตกระดาษ ผลการทดลองพบว่าความเร็วของลมและรูปร่างของไซโคลนจะเป็นตัวแปรที่สำคัญอย่างหนึ่งต่อความสามารถในการอบแห้งของระบบ และเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบถาดพบว่ามีอัตราการแห้งมากกว่าเป็นร้อยละ Oliveira et al. (2011) ได้ศึกษาการอบแห้งชานอ้อยซึ่งมีความชื้นตั้งต้น $48 \pm 4\%$ ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.30-4.75 mm โดยใช้ระบบอบแห้งแบบไซโคลน ผลทดลองพบว่าอัตราการแห้งแปรผันตรงกับอุณหภูมิลมและแปรผกผันกับอัตราการป้อนชานอ้อย ในขณะเดียวกันผลการศึกษาระบบอบแห้งโดยใช้ไซโคลนของผู้วิจัยอื่น ๆ ก็ปรากฏผลในลักษณะเดียวกันคือสามารถลดเวลาการอบแห้งลงได้มากเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบถาด ดังแสดงในผลการศึกษาของ Correa, Graminho, Silva, & Nebra, (2004); Kaensup, Kulwong, & Wongwises, (2006) โดยศึกษาวิธีการอบแห้งโดยใช้ถังหมุนนั้นจะพบว่าสามารถใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นมากกว่าวิธีไซโคลน (Gómez-de la Cruz, Casanova-Peláez, Palomar-Carnicero, & Cruz-Peragón, 2017; Gu, Zhang, Li, & Yuan, 2014) แต่อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้ในกรณีที่ต้องการอัตราการแห้งสูง ๆ วิธีนี้ยังด้อยกว่าวิธีอบแห้งแบบไซโคลน

จากผลการทบทวนเอกสารดังที่กล่าวมาสามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนนั้นเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในงานด้านการอบแห้งหรือลดความชื้นซึ่งสามารถประยุกต์ไปใช้กับผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายและเป็นวิธีที่มีอัตราการแห้งของผลิตภัณฑ์สูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะ



ประยุกต์ใช้ลมร้อนร่วมกับไซโคลนเพื่อให้มะพร้าวชุดฝอยเกิดการไหลแบบหมุนวนในขณะที่ถูกดึงความชื้นออกเพื่อเพิ่มความสามารถในการลดความชื้น (Castilho & Medronho, 1999) และวิธีการทำมะพร้าวคั่วที่ศึกษานี้สามารถพัฒนาให้เป็นกระบวนการผลิตมะพร้าวคั่วแบบต่อเนื่องได้

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลของอุณหภูมิ ความเร็วลมร้อนและจำนวนรอบในการป้อนมะพร้าวเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการพัฒนากระบวนการผลิตมะพร้าวคั่วแบบต่อเนื่องโดยใช้วิธีลมร้อนร่วมกับไซโคลน
2. ศึกษาลักษณะการแห้งของมะพร้าวคั่วจากวิธีอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไซโคลน

วิธีการวิจัย

ชุดทดลองสำหรับผลิตมะพร้าวคั่วแบบลมร้อนร่วมกับไซโคลน

ภาพที่ 1 แสดงส่วนประกอบสำคัญของชุดทดลองสำหรับผลิตมะพร้าวคั่วแบบลมร้อนร่วมกับไซโคลน แหล่งกำเนิดลมมาจากโบลเวอร์ชนิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางขนาด 5.5 kW สถานที่ทดลองเป็นพื้นที่เปิดเพื่อให้ใกล้เคียงกับสภาวะการทำงานจริงหากมีการนำไปใช้ อากาศบริเวณพื้นที่ทดลองมีอุณหภูมิเท่ากับ $27^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 70-80% อากาศด้านจ่ายของโบลเวอร์จะไหลผ่านห้องฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาดตัวละ 800 W จำนวน 6 ตัว การควบคุมอุณหภูมิจะใช้ชุด PID ร่วมกับตัวปรับกำลังไฟฟ้าตัดต่อกระแสไฟของวงฮีตเตอร์ ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดอุณหภูมิ $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ หัววัดอุณหภูมิชนิด Type T จะติดตั้งที่ด้านหน้าปากทางออกมะพร้าวชุดฝอยที่ถูกป้อนมาจาก สกรูหมุน อุณหภูมิลมจะถูกวัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางท่อ ก่อนการทดลองในแต่ละความเร็วลมจะต้องรอจนอุณหภูมิลมหยุดนิ่งเท่ากับค่าที่กำหนดไว้ อุณหภูมิลมระหว่างการทดลองจะคงที่ตลอดเนื่องจากไม่ได้รับผลกระทบจากการป้อนมะพร้าวชุดฝอยเข้ามา อุณหภูมิลมร้อนที่จะศึกษาเท่ากับ 70 80 และ 90 °C

ผลของความเร็วของลมร้อนก่อนเข้าไซโคลนที่ศึกษาทั้งหมดเท่ากับ 25.7 32.0 และ 38.0 m/s ความเร็วทั้งสามระดับได้มาจากการปรับรอบการหมุนของโบลเวอร์โดยตั้งค่าความถี่อินเวอร์เตอร์เท่ากับ 20 25 และ 30 Hz ตามลำดับ ความเร็วของลมจะถูกวัดที่ด้านสุดของโบลเวอร์เนื่องจากมีความปั่นป่วนน้อยกว่าด้านจ่าย ด้านหน้าของโบลเวอร์จะติดตั้งท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 180 mm (D_1) ยาว 1.2 m ที่ปากทางเข้าจะติดตั้งกลุ่มท่อที่มีความยาว 0.1 m เต็มหน้าตัด โดยท่อแต่ละเส้นมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm เพื่อปรับเส้นการไหลให้ราบเรียบขึ้น ความเร็วลมเฉลี่ยด้านเข้าจะใช้เครื่องวัดแบบ Hot wire ยี่ห้อ Extech® รุ่น SDL350 ค่าความละเอียด 0.01 m/s และสามารถวัดความเร็วลมได้ในช่วง 0.2 ถึง 25 m/s วัด



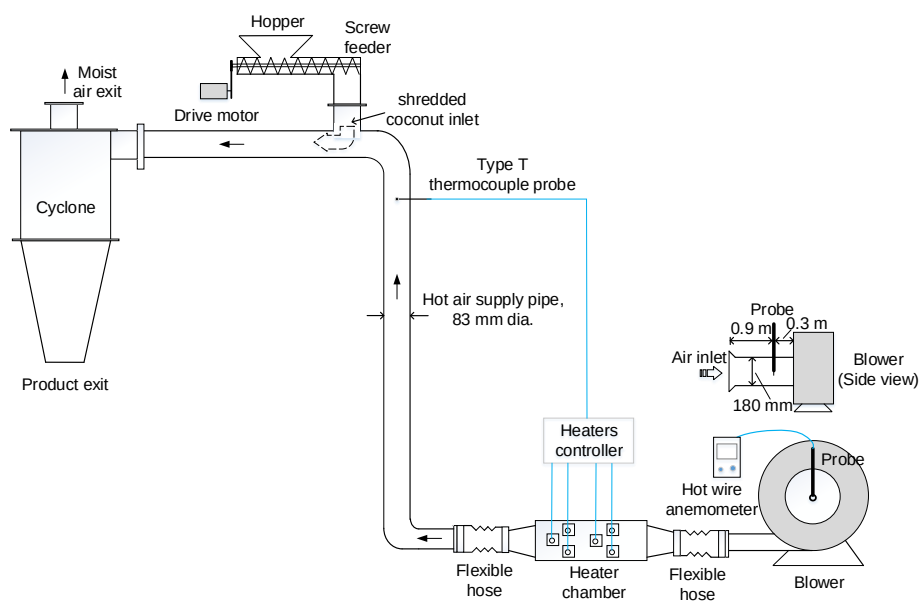
โปรไฟล์การไหลในแนวตั้งผ่านตำแหน่งจุดศูนย์กลางท่อ หัววัดความเร็วลมจะติดตั้งห่างจากทางเข้าโบลเวอร์ 0.3 m (ภาพที่ 1) และห่างจากปากท่อด้านดาด 0.9 m โปรไฟล์ความเร็วทั้งสามระดับความเร็วดังแสดงในภาพที่ 2 จากผลของความเร็วแต่ละตำแหน่ง (V_i) สามารถหาความเร็วเฉลี่ยในท่อด้านดาด ($V_{1,avg}$) ได้จากสมการ (1)

$$V_{1,avg} = \frac{\sum_{i=0}^{17} V_i}{18} \quad (1)$$

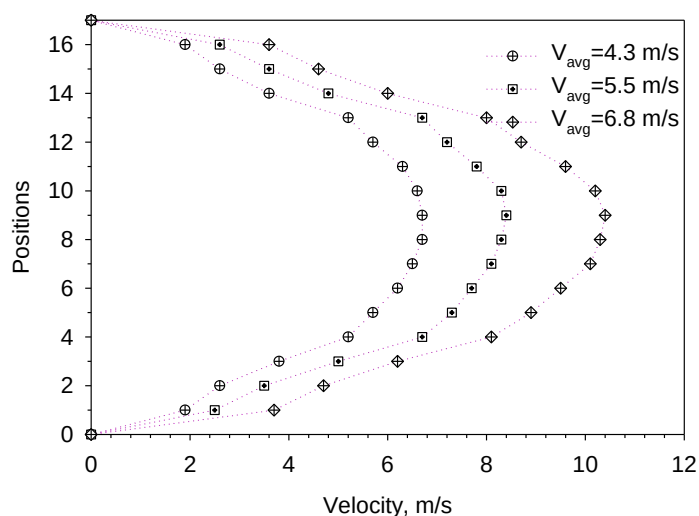
ความเร็วลมร้อนในท่อก่อนเข้าไซโคลน ($V_{2,avg}$) ซึ่งมีท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 83 mm (D_2) สามารถหาได้จากสมการการไหลต่อเนื่องที่ (2)

$$V_{2,avg} = V_{1,avg} (D_1^2/D_2^2) \quad (2)$$

ตารางที่ 1 แสดงค่าความเร็วลม และค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ($Re = V_{avg} D/v$) ที่ตำแหน่งด้านดาด ด้านจ่ายก่อนเข้าไซโคลน การคำนวณใช้ค่าความหนืดกินเมติกของอากาศ (v) ที่อุณหภูมิ 27 และ 80 °C สำหรับด้านดาดกับด้านจ่าย ตามลำดับ



ภาพที่ 1 ลักษณะชุดทดลองอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไซโคลนและส่วนประกอบสำคัญ



ภาพที่ 2 โปรไฟล์ความเร็วในท่อด้านดูดสำหรับหาค่าความเร็วเฉลี่ยโดยที่ปรับความถี่อินเวอร์เตอร์เท่ากับ 20 25 และ 30 Hz มีความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 4.3 5.5 และ 6.8 m/s ตามลำดับ

การทดลอง

การป้อนมะพร้าวขูดฝอยจะใช้ตัวป้อนแบบสกรูที่ถูกขับด้วยมอเตอร์กระแสตรงซึ่งสามารถปรับอัตราการป้อนได้ อัตราการป้อนทุกการทดลองเท่ากับ 200 g/min ปริมาณการป้อนมะพร้าวแต่ละครั้งในสอปเปอร์เท่ากับ 1 kg ซึ่งในระหว่างการทดลองจะต้องทำการปิดฝาสอปเปอร์เพื่อป้องกันลมไหลย้อนผ่านชุดสกรูป้อน เมื่อมะพร้าวขูดฝอยปะทะกับลมร้อนจะถูกเหนี่ยวนำเข้าสู่ไซโคลนและเกิดการเคลื่อนที่แบบหมุนก่อนที่จะตกลงมาเป็นมะพร้าวคั่วที่ด้านล่างของไซโคลนซึ่งมีภาชนะยึดอยู่กับปากทางออกโดยลมร้อนไม่สามารถผ่านทางนี้ได้ ดังนั้นลมร้อนพร้อมความชื้นทั้งหมดจะไหลออกจากไซโคลนที่ทางออกด้านบน การทดลองจะทำการป้อนซ้ำจำนวน 15 รอบ โดยก่อนและหลังการป้อนในแต่ละรอบจะเก็บตัวอย่างมะพร้าวเพื่อนำไปหาความชื้นที่ลดลง

ตารางที่ 1 ความเร็วและค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่ด้านดูดและจ่าย

$V_{1,avg}$ (m/s)	R_e ด้านดูด	$V_{2,avg}$ (m/s)	R_e ด้านจ่าย
4.3	48,266	25.7	227,004
5.5	61,736	32.0	290,354
6.8	76,328	38.0	358,983



การวัดความชื้น

ความชื้นตั้งต้นเฉลี่ยของมะพร้าวคั่วฝอยเท่ากับ $102.47 \pm 10.00\%$ db ตัวอย่างมะพร้าวประมาณ 20 g ก่อนและหลังจากการคั่วในแต่ละรอบจะถูกนำมาหาความชื้นเพื่อหาค่าอัตราส่วนความชื้นที่ลดลง โดยการหาความชื้นจากผลต่างของน้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังการอบแห้งโดยตู้อบไฟฟ้า ตามขั้นตอนที่ใช้เป็นยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น TW3202L ซึ่งมีคุณสมบัติสามารถชั่งน้ำหนักสูงสุดได้ 3200 g ค่าความผิดพลาด ± 0.002 g ค่าความเที่ยงตรง 0.001 g ตัวอย่างจะถูกอบแห้งโดยตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิคงที่ 70°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงจนกระทั่งแห้งสนิท ผลต่างของน้ำหนักจะถูกนำมาคำนวณหาค่าอัตราส่วนความชื้นที่ลดลงในแต่ละรอบ การคำนวณค่าความชื้นคงเหลือแต่ละรอบใช้วิธีคำนวณเปอร์เซ็นต์ความชื้นคงเหลือฐานแห้ง (db) ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$\text{Moisture content, \% (db)} = \frac{w-d}{d} \times 100\% \quad (3)$$

โดยที่ w คือน้ำหนักของตัวอย่างมะพร้าวที่ได้มาจากการอบแห้งในแต่ละรอบ d คือน้ำหนักมะพร้าวจากการคั่วแต่ละรอบที่ได้หลังจากการอบแห้งโดยตู้อบไฟฟ้า

อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) เป็นค่าที่แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลความชื้นในผลิตภัณฑ์ เทียบกับความชื้นก่อนการคั่วในแต่ละรอบดังแสดงในสมการที่ (4)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (4)$$

โดย M_0 และ M_t คือความชื้นก่อนและหลังจากการคั่วในแต่ละรอบ (%db) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3) และ M_{eq} คือความชื้นสมดุลซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความชื้นก่อนและหลังการคั่ว ดังนั้นในการศึกษานี้จึงกำหนดค่าความชื้นสมดุลเป็นศูนย์

ผลการวิจัย

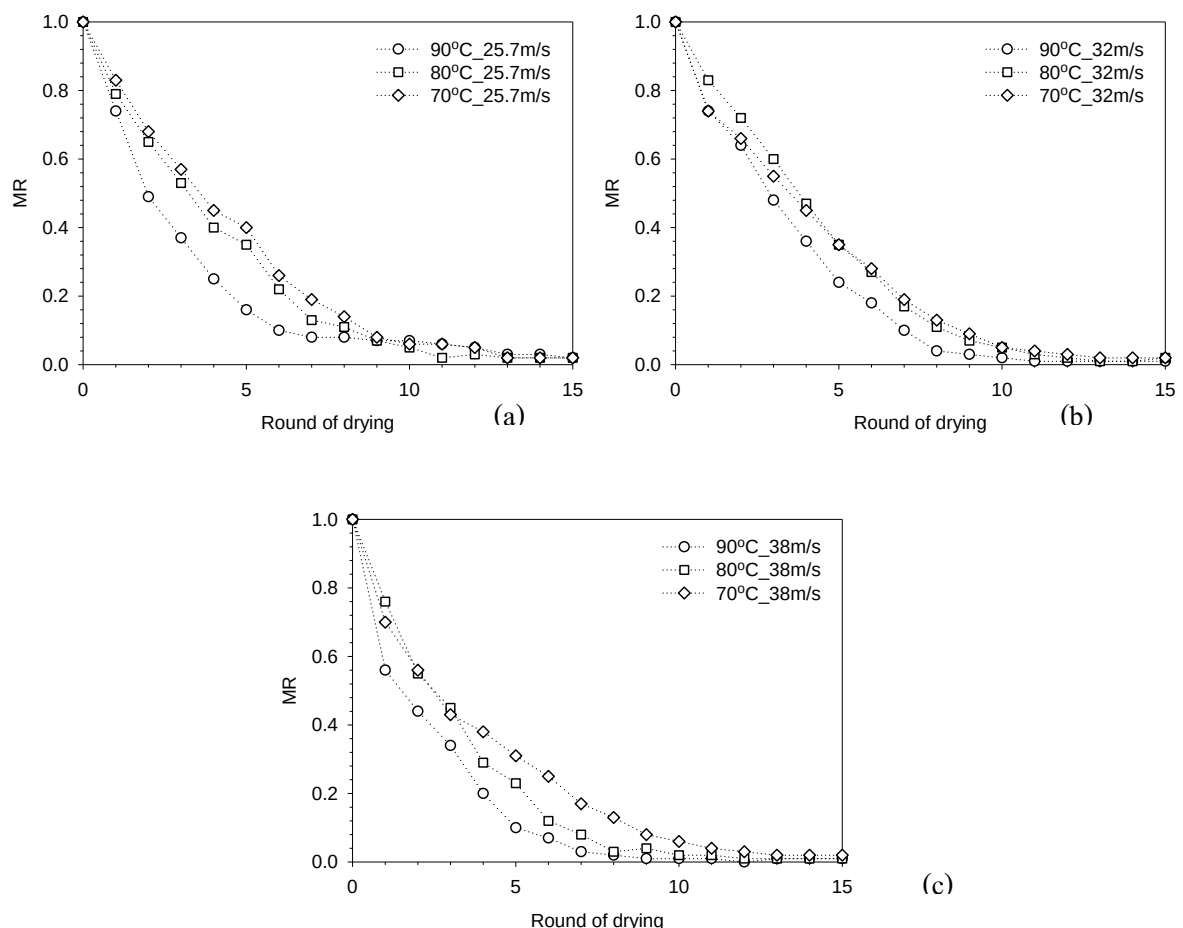
การอภิปรายผลของตัวแปรที่มีต่อลักษณะการแห้งของมะพร้าวคั่วจะแบ่งออก 3 ประเด็น ได้แก่ 1) ผลของอุณหภูมิลมร้อน 2) ผลของความเร็วลมร้อน และ 3) ลักษณะทางกายภาพของมะพร้าวคั่วที่ได้จากอบแห้งโดยวิธีลมร้อนร่วมกับไซโคลนในแต่ละรอบ (Rounds of drying)

ผลของอุณหภูมิลมร้อน

ภาพที่ 3 แสดงผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมกาาแห้งของมะพร้าวคั่ว โดยทดลองที่ความเร็วลมเท่ากับ (a) 25.7 (b) 32.0 และ (c) 38.0 m/s จากผลทดลองทั้งสามระดับความเร็วลมพบว่า อุณหภูมิลมร้อนส่งผลต่ออัตราส่วนความชื้นอย่างมีนัยสำคัญโดยพฤติกรรมกาาลดลงของอัตราส่วนความชื้นมี



ลักษณะใกล้เคียงกันทั้งสามระดับความเร็วลม การลดลงของความชื้นมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับจำนวนรอบการป้อน แต่ในกรณีที่อุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้น อัตราการลดลงของความชื้นในแต่ละรอบการอบแห้งจะเร็วกว่าซึ่งสังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟที่มากกว่า เมื่อผ่านช่วงการลดลงแบบเชิงเส้น การลดลงของอัตราส่วนความชื้นแต่ละรอบจะน้อยลงอย่างเห็นได้ชัดและเริ่มมีแนวโน้มคงที่ เนื่องจากความชื้นในช่วงเชิงเส้นในกรณีอุณหภูมิต่ำมีค่าน้อยกว่า ทำให้ต้องใช้จำนวนรอบการอบแห้งมากกว่าความชื้นมีแนวโน้มคงที่ ตัวอย่างเช่น ที่ความเร็วลม 25.7 m/s อุณหภูมิ 70 °C ต้องอบประมาณ 14 รอบ จึงจะทำให้ค่าความชื้นมีแนวโน้มคงที่ ในขณะที่อุณหภูมิ 90 °C ค่าความชื้นก็มีแนวโน้มคงที่เมื่อป้อนเพียง 8 รอบเท่านั้น สำหรับมะพร้าวหูดฝอยที่มีความชื้นตั้งต้น $102.47 \pm 10.00\%$ db ที่ถูกอบแห้งโดยการป้อนซ้ำ 15 รอบที่มีอุณหภูมิลมร้อนทั้งสามค่าโดยเครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมกับไซโคลนสามารถลดความชื้นให้เข้าสู่สภาวะคงที่ได้



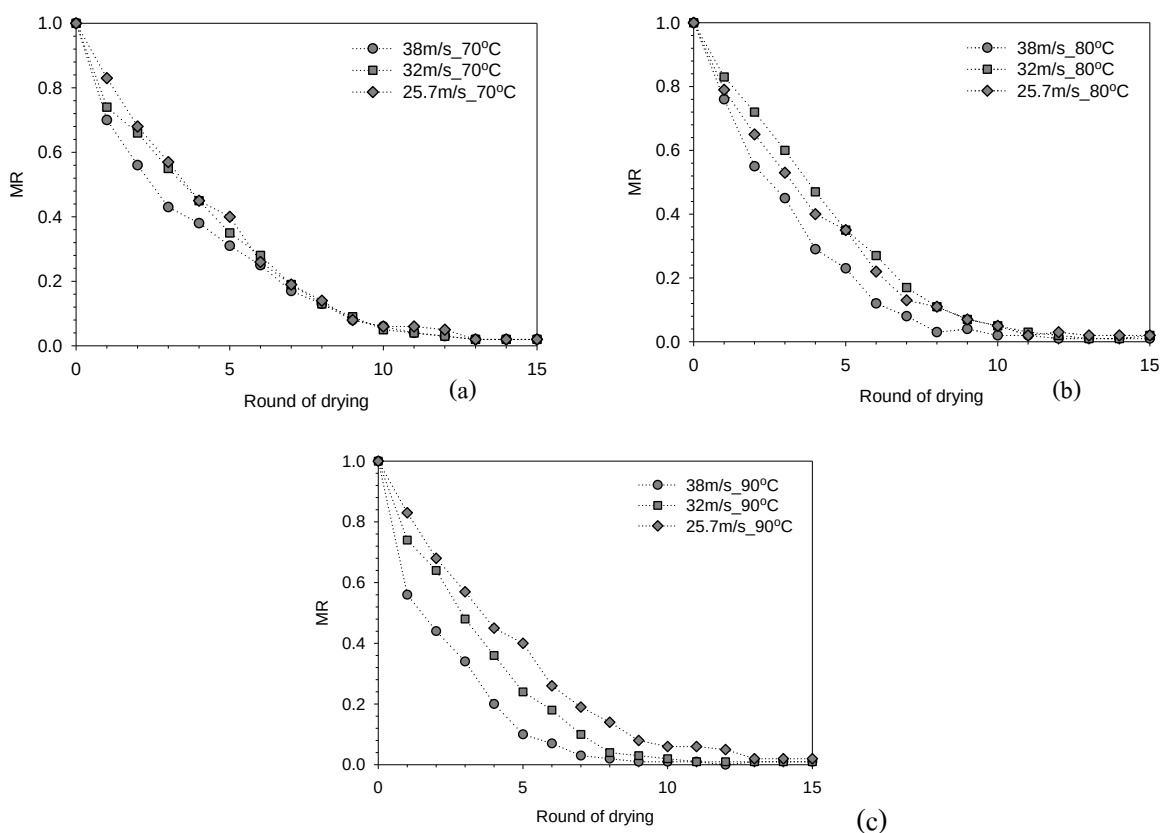
ภาพที่ 3 อิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อนต่อพฤติกรรมการแห้งของมะพร้าวคั่วที่ความเร็วลมเท่ากับ (a) 25.7 (b) 32.0 และ (c) 38.0 m/s



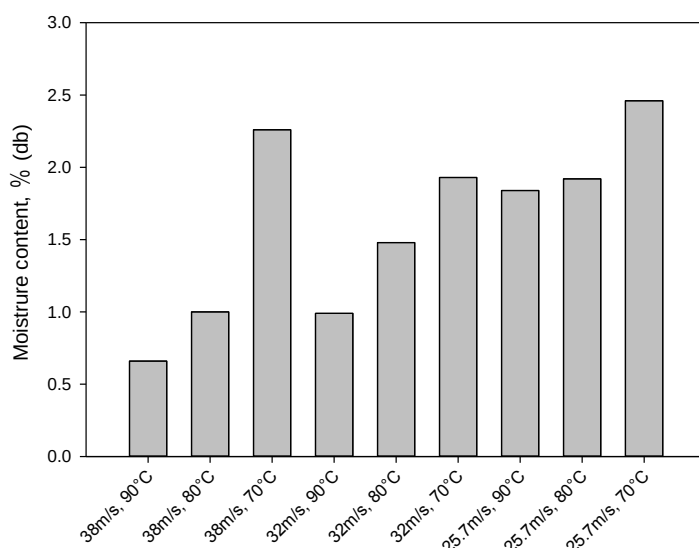
ผลของความเร็วลมร้อน

ภาพที่ 4 แสดงผลของความเร็วลมต่อพฤติกรรมการแห้งของมะพร้าวคั่ว โดยทดลองที่อุณหภูมิ (a) 70 (b) 80 และ (c) 90 °C จากผลการทดลองที่ความเร็วลมเท่ากับ 25.7 32.0 และ 38.0 m/s จากการเปรียบเทียบผลในกรณีภาพที่ 4 (a) กับ (b) พบว่าอิทธิพลของความเร็วลมร้อนต่อการแห้งจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้น ความชันของเส้นกราฟในช่วงแรกกรณี 90 °C จะเพิ่มอย่างมากเมื่ออุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้นส่งผลให้รอบการป้อนซ้ำที่ทำให้ความชื้นคงที่ลดลง สำหรับกรณี 70 °C นั้นพบว่าการเพิ่มความเร็วลมร้อนส่งผลต่ออัตราส่วนความชื้นน้อยมากหลังจากการป้อนซ้ำรอบที่ 8 ซึ่งเกิดขึ้นในรอบการป้อนก่อนที่ความชื้นคงเหลือเข้าสู่สภาวะคงที่ ในขณะที่กรณี 70 °C นั้น การเพิ่มความเร็วลมเริ่มส่งผลต่อการลดลงของอัตราส่วนความชื้น

ภาพที่ 5 แสดงผลความชื้นคงเหลือหลังจากการอบแห้งรอบที่ 15 ของแต่ละการทดลอง กรณีความเร็วลม 38.0 m/s อุณหภูมิ 90 °C มีค่าอัตราส่วนชื้นคงเหลือต่ำสุด ในขณะที่กรณีความเร็วลม 25.7 m/s อุณหภูมิ 70 °C มีค่าอัตราส่วนชื้นคงเหลือสูงสุด ผลดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่าสภาวะการอบแห้งที่ศึกษาที่มีความเร็วและอุณหภูมิสูงกว่าสามารถลดความชื้นคงเหลือสุดท้ายให้มีค่าน้อยกว่า



ภาพที่ 4 อิทธิพลของความเร็วลมต่อพฤติกรรมการแห้งของมะพร้าวคั่ว โดยที่อุณหภูมิ (a) 70 (b) 80 และ (c) 90 °C



ภาพที่ 5 ความชื้นคงเหลือหลังจากการอบแห้งรอบที่ 15

ลักษณะทางกายภาพของมะพร้าวคั่ว

ภาพที่ 6 แสดงตัวอย่างลักษณะมะพร้าวคั่วหลังจากผ่านการคั่ว 15 รอบ ในกรณี 90 °C ความเร็วลม 25.7 32.0 และ 38.0 m/s จากการเปรียบเทียบความชื้นกับความละเอียดของเนื้อมะพร้าวคั่วจะใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับมะพร้าวคั่วที่จำหน่ายในตลาดสดเมืองจังหวัดนครราชสีมาที่คั่วในกระทะจะพบว่ามีสีต่างกัน สีมะพร้าวคั่วจากวิธีลมร้อนร่วมกับไซโคลนจะมีสีอ่อนกว่า ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าเนื้อมะพร้าวยังมีความชื้นเหลืออยู่ สำหรับการเปรียบเทียบความละเอียดพบว่ามะพร้าวคั่วที่จำหน่ายจะมีความละเอียดมากกว่าเนื่องจากต้องมีการกวนให้เนื้อมะพร้าวรับความร้อนให้ทั่วถึงด้วยวิธีการนำที่ผิวกระทะ ในขณะที่วิธีลมร้อนร่วมกับไซโคลนจะอาศัยวิธีให้ความร้อนเพื่อให้ความชื้นเกิดการระเหยและถูกพาออกไปด้วยลมร้อนที่เคลื่อนที่ผ่าน

อภิปรายผล

อุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญต่ออัตราการลดลงของความชื้น กรณีที่อุณหภูมิสูงกว่าจะสามารถลดความชื้นของมะพร้าวชุดฝอยได้ดีกว่าในทุกเงื่อนไขความเร็ว การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนในกรณีความเร็วลมสูงจะส่งผลต่อการแห้งของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่ากรณีความเร็วลมต่ำกว่าความเร็วลมร้อนเป็นตัวแปรสำคัญรองจากอุณหภูมิ การเพิ่มความเร็วในกรณีอุณหภูมิลมร้อนต่ำที่สุดสามารถเพิ่มอัตราการลดลงของความชื้นในการป้อนแต่ละรอบได้เล็กน้อย ผลจากการเพิ่มความเร็วลมจะแสดงชัดเจนเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 90 °C



(a)



(b)



(c)



(d)

ภาพที่ 6 เปรียบเทียบลักษณะมะพร้าวคั่ว (a) จากตลาดสดเทศบาลเมืองจังหวัดนครราชสีมา (b) ความเร็วลมร้อน 25.7 m/s อุณหภูมิเท่ากับ 90 °C (c) กรณีความเร็วลมร้อน 32.0 m/s อุณหภูมิเท่ากับ 90 °C (d) กรณีความเร็วลมร้อน 38.0 m/s อุณหภูมิเท่ากับ 90 °C

ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ทดลองเมื่อความชื้นลดลงหลังจากผ่านการป้อนแต่ละรอบ พบว่ามีความร้อนขึ้น ส่งผลให้การป้อนในรอบหลัง ๆ ทำได้ง่ายขึ้น ในทางปฏิบัตินี้จะพบว่าสามารถเพิ่มอัตราการป้อนให้สูงขึ้นได้ แต่อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้ยังคงศึกษาเฉพาะกรณีการป้อนด้วยอัตราคงที่ สำหรับความชื้นของมะพร้าวคั่วพบว่าการเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อความชื้นลดลง ในขณะที่สีของมะพร้าวคั่วหลังจากการป้อน 15 รอบนั้นพบว่าแตกต่างกับผลิตภัณฑ์มะพร้าวคั่วที่กำหนดในตลาดสดจังหวัดนครราชสีมาอยู่มาก สาเหตุอาจจะเป็นเพราะมะพร้าวที่คั่วด้วยวิธีลมร้อนร่วมกับไซโคลนยังเหลือความชื้นอยู่เล็กน้อยหลังจากผ่านการป้อน 15 รอบ

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งกับเทคนิคสเปาเต้เดเบด (Treeamnuk, 2016) ซึ่งมีขนาดอุปกรณ์ในระบบใกล้เคียงกัน (ฮีตเตอร์ 1,300 W กับ โบลเวอร์ 3 แรงม้า) พบว่าอัตราการอบแห้งด้วยวิธีลมร้อนร่วมกับไซโคลนเมื่อพิจารณาว่าเป็นการผลิตแบบต่อเนื่องจะเท่ากับ 12 kg/h (200 g/min) จะสูงกว่าเทคนิคสเปาเต้เดเบดซึ่งมีอัตราการอบแห้ง 1.41 kg/h เท่านั้น



สรุป

จากผลการทดลองคว่ำมะพร้าวด้วยวิธีลมร้อนร่วมกับไซโคลน โดยศึกษาตัวแปรอุณหภูมิลมร้อนกับความเร็วของลมร้อนซึ่งเป็นตัวแปรหลักที่มีผลต่อการแห้ง สำหรับขนาดของไซโคลนที่ใช้อ้างอิงสัดส่วนจากการศึกษาของ Castilho & Medronho (1999) สามารถสรุปประเด็นสำคัญดังนี้

1. อุณหภูมิ ความเร็วลมร้อน ส่งผลต่อพฤติกรรมการแห้งและจำนวนรอบในการป้อนมะพร้าว จากการประเมินจำนวนรอบในการป้อนกรณีอุณหภูมิ 90 °C ความเร็ว 38.0 m/s ซึ่งเป็นกรณีที่จำนวนรอบการป้อนน้อยที่สุดนั้นพบว่าสามารถพัฒนาระบบผลิตมะพร้าวคว่ำเป็นแบบต่อเนื่องได้โดยการต่ออนุกรมไซโคลน
2. เครื่องคว่ำมะพร้าวแบบลมร้อนร่วมกับไซโคลนสามารถลดความชื้นให้น้อยกว่า 0.66%db ได้ โดยการป้อนซ้ำ 8 รอบซึ่งเป็นกรณีลมร้อนอุณหภูมิ 90 °C ความเร็วลม 38 m/s
3. เครื่องคว่ำมะพร้าวแบบลมร้อนร่วมกับไซโคลนมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาให้สามารถคว่ำมะพร้าวทดแทนวิธีการคว่ำในลักษณะแบบปัจจุบัน

ข้อเสนอแนะ

1. จะต้องมีการศึกษาต้นทุนการทำงานของเครื่องคว่ำมะพร้าวแบบลมร้อนร่วมกับไซโคลนเพิ่มเติมสำหรับการตัดสินใจนำไปใช้งานเชิงพาณิชย์
2. พัฒนาวิธีการให้ความร้อนแก่มะพร้าวคว่ำเพิ่มเติมเมื่อความชื้นมีแนวโน้มคงที่ เพื่อกำจัดความชื้นคงเหลือให้หมดไป
3. วิธีศึกษาพฤติกรรมการไหล การระเหย ภายในไซโคลนโดยวิธีเชิงทัศน์ (Visualization) เป็นประเด็นที่ต้องศึกษาเพิ่มเพื่อเข้าใจตัวแปรของมิติไซโคลนสำหรับการพัฒนาประสิทธิภาพกระบวนการ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ที่สนับสนุนทุนสำหรับการตีพิมพ์ เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย ชุดอบแห้งนี้ได้มาจากการสนับสนุนแหล่งทุนจากโครงการวิจัยและพัฒนาภาครัฐร่วมเอกชนในเชิงพาณิชย์ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ปี 2562 และจากบริษัท ชันโฟรเซนฟู้ด จำกัด



รายการอ้างอิง (References)

- Castilho, L.R. & Medronho R.A. (1999). A Simple Procedure for Design and Performance Prediction of Bradley and Rietema Hydrocyclones. *Minerals Engineering*, 13(2), 183-191.
- Correa, J.L.G., Graminho, D.R.; Silva, M.A.; & Nebra, S.A. (2004). Cyclone as a sugar cane bagasse dryer. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 12, 826-830.
- Gómez-de la Cruz, F.J., Casanova-Peláez, P.J., Palomar-Carnicero, J.M., & Cruz-Peragón, F. (2017). Characterization and analysis of the drying real process in an industrial olive-oil mill waste rotary dryer: A case of study in Andalusia, *Applied Thermal Engineering*, 116, 1-10.
- Grimm, A., Elustondob, D., Mäkelä, M., Segerström M., Kalén, G., Fraikin L., Léonard A., & Larsson, H. S. (2017). Drying recycled fiber rejects in a bench-scale cyclone: Influence of device geometry and operational parameters on drying mechanisms. *Fuel Processing Technology*, 167, 631-640.
- Gu, C., Zhang, X., Li, B., & Yuan, Z. (2014). Study on heat and mass transfer of flexible filamentous particles in a rotary dryer, *Powder Technology*, 267, 234-239.
- Kaensup, W.; Kulwong, S.; & Wongwises, S. (2006). Comparasion of drying kinetics of paddy using a pneumatic conveying dryer with and without a cyclone. *Drying Technology*, 24, 1039-1045
- Oliveira, L.F., Correa, J.L.G., Tosato P.G., Borges S.V., Alves J.G.L.F., & Fonseca, B.E. (2011). Sugarcane Bagasse Drying in a Cyclone: Influence of Device Geometry and Operational Parameters. *Drying Technology*, 29, 946-952.
- Petpradub, N. (2018). Profitability Analysis of Coconut Products to Invest in Product development A Case Study of Arman Community Enterprise, A Processed Coconut Entrepreneur Group in Khok Kian Sub-District, Narathiwat Province. *Princess of Naradhiwas University Journal of Humanities and Social Science*, 5(2), 87-95.
- Phosee, N., Khongbutr P, Uttamating K., & Assawarachan, R. (2013). Effect of temperature on moisture ratio and color changes of mint leaves during hot air drying process, *RMUTSB ACADEMIC JOURNAL*, 1(2), 103-114.
- Pintana, P., Thanompongchart P., Phimphilai, K., & Tippayawong, N. (2016). Combined effect of air temperature and velocity on drying of Thai rice cracker. *KKU ENGINEERING JOURNAL*, 43(S2), 244-246.



- Treemnuak, T. (2016). *Shredded-coconut Drying for Virgin Coconut Oil Production with Spouted-bed Technique* (Research report, Project number: SUT17-703-58-12-49)
- Wisaiprom, N., Kadsayapanand, N., & Palasai, W. (2018). The Comparative Study of Shrimp Drying Process with Low Humidity Air and Hot Air Drying. *Princess of Naradhiwas University Journal*, 11(1), 83-94.