

ผลของการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพและการยอมรับของผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดขบเคี้ยว

Effects of freeze-drying on qualities and acceptance of kao tom mud snack

อณณา สุขลิ้ม^{1*}
Annapha Suklim^{1*}

Received: 19 December 2023 ; Revised: 5 April 2024 ; Accepted: 14 May 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่มีต่อคุณภาพและการยอมรับของผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดรูปแบบใหม่ในรูปแบบของขนมขบเคี้ยว โดยศึกษาโดยใช้กล้วย 3 ชนิดคือ กล้วยไข่ กล้วยน้ำว้า กล้วยหอม เลือกระยะสุกที่มีสีเหลืองทั้งผล หั่นกล้วยแบบตัดขวางเป็นชิ้นวางบนข้าวเหนียวมูน จากนั้นนำไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิประมาณ -56°C ความดัน 0.1 ปาสคาล นาน 72 ชม พบว่า การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งทำให้กล้วยมีสีเหลืองที่อ่อนลงโดยค่า b^* ของกล้วยทั้ง 3 ชนิดลดลงอย่างชัดเจนโดยเฉพาะกล้วยไข่ ($p < 0.05$) ปริมาตรของชิ้นกล้วยเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยปริมาตรกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมเพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 64.72 และ 69.94 สัมพันธ์กับโครงสร้างภายในที่มีความเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ ความแข็งของชิ้นกล้วยหอมวัดโดยใช้แรงกดให้ตัวอย่างชิ้นกล้วยหอมแตกออกน้อยกว่ากล้วยน้ำว้าและกล้วยไข่ ($p < 0.05$) แต่เมื่อวัดความแข็งของผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดทั้งชิ้นที่มีส่วนประกอบของกล้วยและข้าวเหนียวจะพบว่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดขบเคี้ยวที่ทำจากกล้วยทั้ง 3 ชนิดไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) มีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 11,656.26-15,189.87 กรัมแรง ผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดที่ได้มีปริมาณความชื้นร้อยละ 2.35-2.40 และค่า a_w 0.169-0.181 ผู้ทดสอบให้คะแนนการยอมรับโดยรวมผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดทำจากกล้วยหอมและกล้วยน้ำว้าสูงกว่ากล้วยไข่ ($p < 0.05$)

คำสำคัญ: ข้าวต้มมัด, ขนมขบเคี้ยว, การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

Abstract

The objective of this research was to evaluate the effects of freeze-drying on the qualities and acceptance of a new Kao Tom Mud snack product using three varieties of bananas: Khai, Namwa, and Hom. Ripened bananas, indicated by yellow peel color, were selected, peeled, sliced, placed on top of coconut cream-cooked sticky rice, and then freeze-dried at -56°C and 0.1 Pa pressure for 72 hours. Results showed that freeze-drying significantly deteriorated the yellow color (b^* values) of all banana varieties, especially the Khai variety. The volume of sliced Namwa and Hom bananas increased by 64.72% and 69.94%, respectively, due to their porous microstructure under Scanning Electron Microscope. The hardness, as determined by breaking forces, of Hom banana slices was lower than that of Namwa and Khai bananas ($p < 0.05$). However, when the banana slices and sticky rice components were combined as the Kao Tom Mud product, the hardness of the Kao Tom Mud snacks with the three different banana varieties was not statistically different ($p < 0.05$), showing forces ranging from 11,656.26 to 15,189.87 g. The product's moisture content and water activity (a_w) were in the range of 2.35-2.40% and 0.169-0.181, respectively. Freeze-dried Kao Tom Mud snacks made with Hom and Namwa bananas were preferred by the sensory panel ($p < 0.05$).

Keywords: Kao tom mud, Snack, Freeze-drying

¹ หลักสูตรวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี เบอร์โทรศัพท์ 025293002

¹ Department of Food Science and Technology, Faculty of Agricultural Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage Pathum Thani Province Phone 025293002

* Corresponding author. Email: annapha@vru.ac.th

บทนำ

กล้วย (*Musa spp.*) เป็นผลไม้ในวงศ์ Musaceae ที่นิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลายทั่วโลก มีถิ่นกำเนิดในทวีปเอเชียและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ปลูกได้ในพื้นที่เขตร้อนและกึ่งร้อน ปลูกง่าย ให้ผลผลิตทั้งปี กล้วยเป็นไม้ผลเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยที่มีการปลูกเพื่อตลาดภายในและการส่งออก ประเทศไทยเป็นประเทศที่ผลิตกล้วยมากเป็นลำดับที่ 20 ของโลก โดยพันธุ์ที่นิยมปลูกทางการค้าคือ กล้วยน้ำว้า กล้วยหอม และกล้วยไข่ โดยมีผลผลิตรวมถึง 1,075,251 ตันต่อปี (ทีเอ็นเอ็น, 2566) ไทยส่งออกกล้วยทั้งในรูปแบบของผลกล้วยสด กล้วยอบแห้ง และกล้วยแปรรูปไปยังประเทศต่างๆ ทั่วโลก

กล้วยชนิดสำคัญที่ส่งออกคือกล้วยหอมและกล้วยไข่ ไทยส่งออกกล้วยสดไปยังประเทศต่างๆ ที่สำคัญ ได้แก่ จีน ญี่ปุ่น ฮองกง มาเลเซีย และกัมพูชา นอกจากผลกล้วยสดแล้วยังส่งออกกล้วยอบแห้งไปยังอเมริกาและสิงคโปร์ สถิติการนำเข้าสินค้ากล้วยแปรรูปและกล้วยสดจากประเทศไทยของสหรัฐอเมริกา ในปีพ.ศ. 2565 พบว่ามีมูลค่าสูงถึง 3.3 ล้านเหรียญสหรัฐหรือประมาณ 115.5 ล้านบาท โดยปริมาณการนำเข้าเพิ่มขึ้นจากปีพ.ศ. 2564 ถึงร้อยละ 25.10 (สำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ, 2566) ปัจจุบันรัฐบาลไทยมีการส่งเสริมให้มีการปลูกและแปรรูปกล้วยเพื่อตอบสนองความต้องการบริโภคภายในประเทศให้มากขึ้นและตอบสนองความต้องการการบริโภคในรูปแบบใหม่

กล้วยสำหรับบริโภคสดหลังจากเก็บเกี่ยวจะถูกนำมาบ่มเพื่อให้สุกสม่ำเสมอ กล้วยหอมมีระยะการสุกแบ่งออกเป็น 8 ระยะตามการเปลี่ยนแปลงของสีของเปลือกกล้วย (Peel Color Index, PCI) (CSIRO, 1972) ระยะการสุกกล้วยที่เหมาะสมสำหรับการบริโภคสดอยู่ที่ระดับ 6 หรือ 7 ซึ่งเป็นระยะสุกหรือระยะสุกเต็มที่ (เบญจมาศ ศิลาชัย, 2538) ส่วนกล้วยไข่มีระยะการสุกของกล้วยไข่แบ่งออกเป็น 5 ระดับ (จินดา ศรศรีวิชัย, 2541) ในระหว่างกระบวนการสุกกล้วยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีต่างๆ เนื่องจากกล้วยเป็นผลไม้บ่มสุก (Climacteric fruit) ที่เนื้อเยื่อค่อนข้างนิ่ม ง่ายต่อการเน่าเสีย เกิดการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัส คุณค่าทางโภชนาการ คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสอย่างรวดเร็ว จึงนิยมนำไปแปรรูปเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจ ดังจะเห็นผลิตภัณฑ์จากกล้วยหลากหลายรูปแบบเช่น กล้วยอบแห้ง กล้วยฉาบ กล้วยอบเนย ทอฟฟี่ แป้งกล้วย กล้วยในน้ำเชื่อมบรรจุกระป๋อง กล้วยกวน กล้วยตาก นอกจากนี้ยังมีการนำไปประกอบอาหารคาวหวานเช่น กล้วยเชื่อม ขนมกล้วย ข้าวต้มมัด

การทำแห้งเป็นหนึ่งในวิธีที่นิยมใช้เนื่องจากสามารถลดปริมาณความชื้นและค่าออกซิเดชันของผลิตภัณฑ์จนถึง

ระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ กิจกรรมของเอนไซม์ การเกิดปฏิกิริยาเคมีต่างๆ และช่วยยืดอายุการเก็บรักษา อย่างไรก็ตามการทำแห้งแบบดั้งเดิมโดยใช้ลมร้อนมักมีผลทำให้เกิดการเสื่อมสลายของคุณภาพทางกายภาพและเคมีต่างๆ เช่น กล้วยเกิดการหดตัว เกิดการเปลี่ยนสีเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล ส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค จึงมีการพัฒนาการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งหรือการทำแห้งแบบระเหิด (Freeze drying or lyophilization) ขึ้นเพื่อใช้ในการทำแห้งผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งมีข้อดีหลายประการเช่น คงรักษาคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการดีกว่าการทำแห้งแบบดั้งเดิม ไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการทำแห้ง ผลิตภัณฑ์สามารถเก็บรักษาในสภาวะของแห้งได้นานเป็นต้น (Krokida *et al.*, 2001 ; Shukla, 2011)

ปัจจุบันการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจึงถูกนำมาใช้ร่วมกับผักและผลไม้หลายชนิด เช่น หน่อไม้ฝรั่ง แครอท พริกหวาน พักทอง มะเขือเทศ แอปเปิ้ล ฝรั่ง สตรอเบอร์รี่ มะละกอ แบลคเบอร์รี่ สับปะรด มะม่วง กล้วย เป็นต้น คุณภาพและคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นผลโดยตรงมาจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพ เช่น โครงสร้าง ความเป็นรูพรุน ความหนาแน่น เนื้อสัมผัส สี ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทำแห้ง สภาวะหรือปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิ ความดัน (pressure chamber) อัตราการแช่แข็ง (freezing rate) ระยะเวลาการทำแห้ง (Nowak & Jakubczyk, 2020 ; Bhatta *et al.*, 2020 ; Serna-Cock *et al.*, 2015) Krokida *et al.* (1998) ศึกษาการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งชั้นกล้วยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ความหนา 8 มิลลิเมตร ที่ผ่านการแช่แข็งที่ -35 °C นาน 48 ชม. ทำแห้งโดยใช้ความดัน 3-300 ปาสคาล อุณหภูมิ -50 ถึง -8 °C นาน 24 ชม พบว่า ความเป็นรูพรุนของชั้นกล้วยมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ -50 °C เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของชั้นกล้วยทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีค่าลดลงจาก 1900 เหลือ 400 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

สภาวะที่ใช้ในการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของกล้วย การทำแห้งโดยใช้ความดัน 8 ปาสคาล อุณหภูมิ -40 °C นาน 72 ชม. กับชั้นกล้วยหนา 3 มิลลิเมตร ที่ผ่านการแช่แข็งที่ -24 °C นาน 72 ชม. ทำให้ค่าสี L^* เพิ่มขึ้น ส่วนค่า a^* และ b^* ลดลง (Valentina *et al.*, 2016) Jiang *et al.* (2010) เปรียบเทียบสีของชั้นกล้วยความหนา 5 มิลลิเมตรในขั้นตอนของการแช่แข็งก่อนการทำแห้ง -30 °C และภายหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40 °C กับสีของชั้นกล้วยสดพบว่า สีของชั้นกล้วยในแต่ละขั้นตอนเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าสี L^* a^* b^* เล็กน้อย สีจะเปลี่ยนแปลงชัดเจนในกรณีการทำแห้งชั้นกล้วยแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้ไมโครเวฟ (microwave freeze drying)

ร่วมด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าชิ้นกล้วยหลังการทำแห้งเกิดการหดตัวลง (shrinkage) เล็กน้อย การปรับปรุงคุณภาพทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของกล้วยสามารถทำได้โดยการปรับสภาพกล้วยด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การใช้กรดแอสคอร์บิกและมิวซีเลจ (Milani *et al.*, 2020)

Oikonomopoulou *et al.* (2011) ศึกษาผลของสภาวะการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาคของผลิตภัณฑ์อาหาร พบว่า ความหนาแน่นและความเป็นรูพรุนของข้าวฟริสตรายขึ้นอยู่กับสภาวะต่างๆ เช่น ระยะเวลาการต้มหรือการให้ความร้อนข้าว และความดันที่ใช้ในสภาวะการอบแห้ง ในระหว่างการต้มเมล็ดข้าวจะดูดน้ำและเกิดการขยายปริมาตรเมื่อนำไปแช่แข็งและทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะเกิดการระเหิดของน้ำแข็งทำให้เกิดรูพรุน ความเป็นรูพรุนหรือปริมาณรูพรุนจะสัมพันธ์กับปริมาณน้ำที่เมล็ดข้าวดูดเข้าไป ระยะเวลาการต้มข้าวที่นานขึ้นส่งผลให้ความเป็นรูพรุนเพิ่มมากขึ้นในขณะที่ความหนาแน่นของเมล็ดข้าวลดลง ทั้งนี้ความเป็นรูพรุนและความหนาแน่นของเมล็ดข้าวยังขึ้นอยู่กับความดันที่ใช้ในการทำแห้ง โดยที่ความเป็นรูพรุนจะแปรผกผันกับความดัน ส่วนความหนาแน่นของเมล็ดข้าวจะแปรผันตามความดันที่ใช้ในสภาวะการอบแห้ง ในกรณีของข้าวพบว่า ความเป็นรูพรุนของข้าวเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 40-50 เมื่อต้มข้าวนาน 8-24 นาที เปรียบเทียบกับระยะเวลาต้มข้าวน้อยที่สุดที่ 4 นาที

การใช้การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเพื่อผลิตขนมขบเคี้ยวที่มีข้าวหรือข้าวเหนียวเป็นส่วนประกอบร่วมกับผลไม้ที่มีข้อมูลงานวิจัยค่อนข้างจำกัด สทนทกานต์ คุณเอนก และคณะ (2565) ศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเหนียวมูนทุเรียนฟริสตราย ส่วนผลิตภัณฑ์ข้าวเหนียวมะม่วงฟริสตรายที่มีวางจำหน่ายในท้องตลาดนั้นไม่ปรากฏข้อมูลผลการศึกษาวิจัย การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่มีต่อคุณภาพและการยอมรับของผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัด ซึ่งเป็นข้าวต้มมัดที่ถูกพัฒนาขึ้นเป็นข้าวต้มมัดรูปแบบใหม่ในรูปแบบของข้าวต้มมัดขบเคี้ยวโดยใช้กล้วย 3 ชนิดได้แก่ กล้วยน้ำว้า กล้วยหอม และกล้วยไข่

วิธีดำเนินงาน

1. การเตรียมวัตถุดิบ

กล้วยน้ำว้า [Musa (ABB group) "Klaui Nam Wa"] กล้วยหอม [Musa (AAA group) "Klaui Hom Thong" กลุ่มย่อย Gros Michel] และกล้วยไข่ [Musa (AA group) "Kluai Khai" กลุ่มย่อย Sucrier] ซื้อจากตลาดไท จังหวัดปทุมธานี โดยเลือกซื้อผลกล้วยในระยะผลสุกที่เปลือกทั้งผลมีสีเหลือง กล้วยหอมและกล้วยน้ำว้าระยะการสุกที่ 6 ตามมาตรฐาน Peel Color Index (PCI) (CSIRO, 1972) ส่วนกล้วยไข่ระยะการสุกที่ 4 (จินดา ศรศรีวิชัย, 2541) และเลือกผลที่มีรูปร่าง

และขนาดสม่ำเสมอ ล้างทำความสะอาด ปอกเปลือก และหั่นตัดขวางเป็นแว่นขนาดความหนา 3 มิลลิเมตร กล้วยหลังจากหั่นแล้วจะถูกนำไปใช้ทันที

วัตถุดิบข้าวเหนียวและใบเตยหอม ซื้อจากตลาดไท จังหวัดปทุมธานี ข้าวเหนียวเป็นข้าวเหนียวพันธุ์กข 6 ข้าวเก่าประมาณ 4 เดือน ส่วนวัตถุดิบอื่นได้แก่ กะทิ เกลือ น้ำตาลทราย ซื้อจากโลตัสซูเปอร์มาร์เก็ต

2. การทำข้าวต้มมัดขบเคี้ยวทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

ศึกษาชนิดของกล้วย 3 ชนิดได้แก่ กล้วยน้ำว้า กล้วยหอม และกล้วยไข่ ที่มีต่อคุณภาพของข้าวต้มมัดขบเคี้ยวทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง การทำข้าวต้มมัดขบเคี้ยวทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีขั้นตอนการดำเนินงานนี้ นำข้าวเหนียว 150 กรัม ที่ผ่านการล้างทำความสะอาดและแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง นาน 8 ชั่วโมง มาผัดผสมกับกะทิ 200 กรัม น้ำใบเตย 50 กรัม และเกลือ 5 กรัม นาน 30 นาที ที่อุณหภูมิ 90 °C โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลในการวัดอุณหภูมิ

เมื่อครบเวลาเติมน้ำตาลทราย 75 กรัม และผัดหรือกวนผสมให้เข้ากันนาน 5 นาที พักทิ้งไว้ให้เย็นโดยตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 30 นาที ตักใส่พิมพ์ทรงกลมหรือถาดหลุม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 ซม. หลุมละ 5 กรัม เกลี่ยให้มีความหนาเท่ากันประมาณ 7 มิลลิเมตร ตักกะทิ 3 กรัมหยอดลงบนด้านหน้าของข้าวเหนียว จากนั้นนำกล้วยที่หั่นเป็นแว่นหนา 3 มิลลิเมตร วางลงด้านบน นำพิมพ์ไปแช่แข็งในตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 °C นาน 48 ชม ก่อนการทำแห้งแบบเยือกแข็งโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze dryer) รุ่น Freezone 6 plus (Labconco, USA) ใช้เวลานาน 72 ชม โดยระหว่างการทำแห้งเครื่องจะทำงานที่อุณหภูมิประมาณ -56 °C ความดัน 0.1 ปาสคาล

2.1.1 คุณภาพทางกายภาพ

1) ค่าสี CIE $L^* a^* b^*$ วัดค่าสีของข้าวต้มมัดก่อนและหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยวัดสีของชิ้นกล้วยและข้าวเหนียวด้วยเครื่องวัดสี (color meter) (Minolta, Japan) แสดงผลเป็นค่า L^* แสดงถึงความสว่าง ค่า a^* แสดงถึงความเป็นสีแดง ($+a^*$) และความเป็นสีเขียว ($-a^*$) ค่า b^* แสดงถึงความเป็นสีเหลือง ($+b^*$) และความเป็นสีน้ำเงิน ($-b^*$)

2) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนา (มม.) ของข้าวต้มมัดก่อนและหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยวัดในส่วนของชิ้นกล้วยและข้าวเหนียวที่ทำแห้งต่างๆ ของชิ้นกล้วยและข้าวเหนียวจำนวน 2 ตำแหน่งต่อชิ้นด้วย Vernier Caliper (Mitutoya, Japan) คำนวณการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนา (%) (จารุวรรณ กุลวิตร, 2550)

$$\% \text{ change} = \frac{X_i - X}{X_i} \times 100$$

X_i = เส้นผ่าศูนย์กลางหรือความหนาของการทำแห้ง

X = เส้นผ่าศูนย์กลางหรือความหนาหลังการทำแห้ง

3) ปริมาตร (ซม³) ของข้าวต้มมัดก่อนและหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยแยกวัดในส่วนของชั้นกล้วยและข้าวเหนียวใช้เทคนิคการแทนที่ (displacement techniques) คำนวณการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร (%) (Swasdisevi *et al.*, 2007)

$$\% \text{ volume change} = \frac{V_i - V}{V_i} \times 100$$

V_i = ปริมาตรก่อนการทำแห้ง

V = ปริมาตรหลังการทำแห้ง

4) โครงสร้างจุลภาค (microstructure) วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของกล้วยหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น JEOL JSM-5410LV (Jeol Ltd., Japan) เตรียมตัวอย่างโดยนำตัวอย่างชั้นกล้วยที่ตัดตามแนวขวางแล้วไปติดลงบน stub (mounting) ฉาบทองที่ผิวตัวอย่างโดยใช้เครื่องฉาบผิว (Sputter Coater) Polaron SC7640 (1kV, 10 mA เวลา 4 นาที) (Quorum Technologies, UK) นำกล้วยที่ฉาบทองไปส่องดูโครงสร้างโดยใช้ Accelerating voltage 15 kv ถ่ายภาพที่กำลังขยาย 50 เท่าและ 150 เท่า

5) เนื้อสัมผัส (Texture) วัดเนื้อสัมผัสโดยวัดความแน่นเนื้อ (firmness) ของชั้นกล้วยสดใช้หัววัด P/2 หัววัดทรงกระบอกขนาด 2 มม. วัดแรงกด (compression) หัววัดลงไปในตัวอย่างระยะทาง 6 มม. ด้วยความเร็ว 1 มม./วินาที และวัดความแข็ง (hardness) ของข้าวต้มมัดทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและส่วนของชั้นกล้วยและข้าวเหนียว โดยการวางตัวอย่างลงบน Crisp Fracture Support Rig (HDP/CFS) วัดแรงกดที่ทำให้ตัวอย่างเกิดการแตกออกโดยใช้หัววัด P/0.25S ทรงกลมขนาด ¼ นิ้ว กดลงไปในตัวอย่างระยะทาง 6 มม. ด้วยความเร็ว 1 มม./วินาที ใช้เครื่อง Texture analyzer รุ่น TA.XT. Plus (Stable Micro Systems, UK) ทำการวัดตัวอย่างละ 5 ซ้ำ

2.1.2 คุณภาพทางเคมี

1) Water activity (a_w) ของข้าวต้มมัดก่อนและหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยวัดในส่วนของชั้นกล้วย

ข้าวเหนียว และข้าวต้มมัดทั้งชิ้น ด้วย Aqualab Series 2 (Decagon, USA)

2) ปริมาณความชื้น (% moisture content) ของข้าวต้มมัดก่อนและหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยวัดในส่วนของชั้นกล้วย ข้าวเหนียว และข้าวต้มมัดทั้งชิ้น (AOAC, 2000)

3) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของข้าวต้มมัดก่อนและหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยวัดในส่วนของชั้นกล้วย ข้าวเหนียว และข้าวต้มมัดทั้งชิ้น สุ่มตัวอย่างกล้วยและข้าวเหนียวมาทำการปั่นให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นผสม บีบสกัดส่วนที่เป็นของเหลวเพื่อนำไปวัดค่า pH ด้วย pH meter (Eutech instrument, USA)

4) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ (Total soluble solid) ของกล้วยและข้าวเหนียว โดยใช้ Digital refractometer (Atago, Japan)

2.1.3 คุณภาพทางประสาทสัมผัส

ทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสของข้าวต้มมัดแช่เยือกแข็งที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นรส ความกรอบ และความชอบรวม ใช้ผู้ทดสอบทั้งฝึกฝนจำนวน 20 คน โดยผู้ทดสอบแต่ละคนจะได้ตัวอย่างแบบสุ่มคนละ 3 ตัวอย่างที่มีรหัสเป็นเลขสุ่ม 3 หลัก ให้คะแนนการยอมรับโดยใช้สเกลการยอมรับแบบ 9 ระดับ (9-Point Hedonic Scale) (9 = ชอบมากที่สุด ถึง 1 = ไม่ชอบมากที่สุด)

3. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design) สำหรับคุณภาพทางกายภาพ และคุณภาพทางเคมี วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์แบบบล็อก (Randomized Complete Block Design, RCBD) สำหรับคุณภาพทางประสาทสัมผัสวิเคราะห์ข้อมูลโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test ส่วนการเปรียบเทียบค่าสีก่อนและหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งใช้ Independent Sample T-test โดยกำหนดความเชื่อมั่นทางสถิติที่ $p < 0.05$

ผลการทดลองและอภิปรายผล

คุณภาพทางกายภาพ

ค่าสี CIE $L^* a^* b^*$

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีผลต่อสีของข้าวต้มมัดซึ่งในที่นี้แยกพิจารณาเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของชั้นกล้วยด้านบนและส่วนของข้าวเหนียวด้านล่าง ในส่วนของชั้นกล้วยพบว่าสีของกล้วยทั้ง 3 ชนิดคือกล้วยไข่ กล้วยน้ำว้า และกล้วย

หอมเกิดการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้เด่นชัดคือ ค่าสี b^* หรือค่าความเป็นสีเหลืองของกล้วยทั้ง 3 ชนิดมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (Table 1) ส่วนค่าสี L^* และค่าสี a^* เกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ค่า L^* ความสว่างของกล้วยน้ำว้ามีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสี a^* ความเป็นสีแดงของกล้วยหอมมีค่าลดลงหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ($p < 0.05$) สีที่ปรากฏต่อสายตาของชิ้นกล้วยไข่เปลี่ยนจากสีเหลืองส้มเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อน

ส่วนกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมสีเปลี่ยนจากสีเหลืองขาวเป็นสีขาวเหลืองดัง Figure 1 สอดคล้องกับ Valentina *et al.* (2016) และ จารุวรรณ กุลวิศ (2550) ที่ศึกษาผลของการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่มีต่อคุณลักษณะของกล้วย Valentina *et al.* (2016) พบว่า การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีผลทำให้เนื้อกล้วยที่มีสีเหลืองออกขาวจะเปลี่ยนเป็นสีขาวเหลือง โดยค่าสี b^* ลดลงจาก 34.10 เหลือ 20.39 ค่าสี a^* ลดลงจาก 10.37 เหลือ 6.92 ($p < 0.05$) ส่วนค่าความสว่าง L^* ไม่เปลี่ยนแปลง จารุวรรณ กุลวิศ (2550) รายงานว่า กล้วยแผ่นที่ทำจากกล้วยหอมเมื่อนำมาอบแห้งโดยใช้วิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะมีสีครีมออกขาวซีด

สีของกล้วยแผ่นทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ทำจากกล้วยสดหรือกล้วยที่ผ่านการแช่ในสารละลายซูโครสก่อนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการทำแห้งกล้วยด้วยวิธีอื่นๆ กล้วยหอมสดที่อบแห้งแบบอากาศร้อน การอบแห้งแบบอากาศร้อนร่วมกับไอน้ำร้อนยิ่งยวด การอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด จะทำให้กล้วยแผ่นมีสีเหลืองเข้มขึ้น มีสีน้ำตาลหรือน้ำตาลแดงเข้ม (จารุวรรณ กุลวิศ, 2550) Krokida *et al.* (2001) ใช้กล้วยที่ผ่านการทำแห้งแบบออสโมซิส (osmotic dehydration) ในสารละลายซูโครส 50% ที่ 40 °C อบแห้งในตู้อบลมร้อนที่ 70 °C นาน 10 ชม ก่อนนำไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่าสีของกล้วยภายหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ เช่น การอบแห้งแบบอากาศร้อน การอบแห้งแบบสุญญากาศ การอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟ โดยที่ค่า L^* ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ค่อนข้างคงที่ ส่วนค่า a^* เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ค่า b^* เพิ่มขึ้นน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ ที่กล่าวมาที่พบค่า L^* จะลดลงมาก เป็นผลมาจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล

Table 1 CIE $L^* a^* b^*$ of banana and sticky rice components of Kao Tom Mud snack before and after freeze drying

Component	L*		a*		b*	
	Before	After	Before	After	Before	After
Banana						
Khai	65.94±2.23 ^{ns}	68.38±2.44	-10.93±1.05 ^{ns}	-11.67±1.65	46.20±2.13 ^a	31.79±2.15 ^b
Nam wa	78.13±2.06 ^b	82.45±1.46 ^a	-15.27±0.85 ^{ns}	-15.62±0.34	26.50±2.16 ^a	20.13±0.67 ^b
Hom	76.18±2.31 ^{ns}	78.98±4.59	-17.37±0.47 ^a	-15.57±1.53 ^b	32.21±2.29 ^a	22.81±1.56 ^b
Rice						
Sticky rice	51.96±2.00 ^b	64.21±2.68 ^a	-14.99±0.42 ^{ns}	-14.86±0.23	8.83±0.62 ^b	16.74±0.49 ^a

^{ab} Means in the same row with different letters are statistically different ($p < 0.05$)

^{ns} Means in the same row are not statistically different ($p > 0.05$)



Figure 1 Kao Tom Mud snack made with 'Khai' 'Namwa' and 'Hom' banana (a) before freeze drying (b) after freeze drying

Krokida *et al.* (2001) กล่าวว่าสภาวะที่ใช้ในการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเพื่อทำให้เกิดการระเหิดของน้ำแข็งเป็นสภาวะที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำและอุณหภูมิที่ต่ำมากจะช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่มักเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทำแห้ง Jiang *et al.* (2010) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพเคมีกายภาพของกล้วยคาเวนดิช (Cavendish) ผ่านโดยการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งร่วมกับไมโครเวฟ ก็พบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าสีจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้ไมโครเวฟเนื่องจากพลังงานไมโครเวฟสามารถทำให้เกิดสีน้ำตาลอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาการเมลลิวเซชันขึ้นได้

ส่วนของข้าวเหนียวที่อยู่ด้านล่างของชั้นผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดพบว่าข้าวเหนียวก่อนทำแห้งซึ่งเป็นข้าวเหนียวสุก

มีลักษณะเป็นเม็ดที่มีความใส หลังจากการทำแห้งเปลี่ยนเป็นจะเป็นเม็ดที่มีความขาวขุ่นทึบแสงมากขึ้นและมีสีเหลืองเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทำให้ค่าสี L^* และค่าสี b^* เพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) (Table 1) การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีของข้าวเหนียวมูนก่อนและหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งไม่มีข้อมูลรายงาน มีเพียงการรายงานค่าสีของข้าวเหนียวมูนหลังการทำแห้งดังนี้ สอนทกานต์ คุณเอนก และคณะ (2565) พบว่า สีของข้าวเหนียวมูนที่อยู่ด้านล่างของชั้นข้าวเหนียวมูนทุเรียนฟรีสตรายที่ทำจากข้าวเหนียวมูน 300 กรัมกับน้ำกะทิในปริมาณต่างๆ กัน 100 150 และ 200 มล. มีค่า L^* 84.34-84.63 ค่า a^* -0.75 ถึง -0.79 และค่า b^* 7.69-7.96 ซึ่งมีค่าแตกต่างจากผลการทดลองเนื่องมาจากตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่าง สภาวะที่ใช้ในการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีความแตกต่างกัน

Table 2 Diameter (mm) and thickness (mm) of banana and sticky rice components of Kao Tom Mud snack before and after freeze drying and diameter and thickness changes (%)

Component	Diameter (mm)		Diameter changes (%)	Thickness (mm)		Thickness changes (%)
	Before	After		Before	After	
Banana						
Khai	23.5±0.7	21.6±0.9	-8.07 ^{ns}	3.3±0.4	3.8±0.5	+5.47 ^{ns}
Namwa	29.8±0.5	27.6±1.2	-7.71	4.1±0.4	4.4±0.3	+7.11
Hom	32.2±0.3	30.1±0.4	-6.65	4.1±0.6	4.5±0.2	+9.64
Rice						
Sticky rice	29.7±0.6	27.8±1.3	-6.36	6.9±0.6	7.0±1.0	+1.45

^{ns} Means in the same column within the group (i.e. Banana group) are not statistically different ($p > 0.05$)

2) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนา

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.) และความหนา (มม.) ของชิ้นกล้วยและข้าวเหนียวถูกวัดก่อนและหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเพื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงของเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนา (ร้อยละ) พบว่าชิ้นกล้วยทั้ง 3 ชนิดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ลดลงภายหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยกล้วยไข่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ -8.07 และกล้วยหอมเกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่ำที่สุดเท่ากับร้อยละ -6.65 อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของกล้วยทั้ง 3 ชนิดทางสถิติพบว่าไม่มีความแตกต่างกัน ($p > 0.05$) (Table 2) ส่วนของข้าวเหนียวก็เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเช่นกันโดยมีขนาดลดลงร้อยละ -6.36

ส่วนความหนาเกิดการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง โดยชิ้นกล้วยทั้ง 3 ชนิด

ภายหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีความหนาเพิ่มขึ้น กล้วยหอมเกิดการเปลี่ยนแปลงของความหนามากที่สุดร้อยละ 9.64 ตามด้วยกล้วยน้ำว้าและกล้วยไข่ร้อยละ 7.11 และ 5.47 แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) ส่วนข้าวเหนียวมีความหนาเพิ่มขึ้นเล็กน้อยดัง Table 2 ผลการทดลองที่ได้ตรงกันข้ามกับ จารุวรรณกุลวิศ (2550) ที่พบว่า การอบแห้งกล้วยหอมแบบทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งทำให้ชิ้นกล้วยเกิดการหดตัวทั้งทางด้านความหนาและด้านรัศมี/เส้นผ่าศูนย์กลาง โดยทำให้ความหนาหดตัวร้อยละ 25.55 รัศมีหดตัวร้อยละ 1.80 โดยให้เหตุผลว่ากล้วยแผ่นที่อบแห้งด้วยวิธีแบบต่างๆ รวมถึงทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้นจะเกิดการหดตัวด้านความหนามากกว่าด้านรัศมีเนื่องจากการระเหยของน้ำเกิดในทิศทางความหนามากกว่ารัศมี แต่การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งพบว่าทำให้เกิดการหดตัวน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบอากาศร้อน การอบแห้งแบบอากาศร้อนร่วมกับไอน้ำร้อนยิ่งยวด การอบ

แห้งแบบสูญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด การอบแห้งส่วนใหญ่ทำให้เกิดการหดตัวของอาหารซึ่งการหดตัวที่เกิดขึ้นมีรูปแบบที่แตกต่างกันและไม่สม่ำเสมอ โดยทั่วไปการสูญเสียทำให้กล้วยแผ่นหดตัวจากผิวนอกโดยบริเวณขอบของกล้วยแผ่นที่แข็งจะคงสภาพไว้และเว้าลงไปบริเวณรอบๆ จุดศูนย์กลางซึ่งเป็นส่วนที่เนื้ออ่อนกว่าตรงขอบ แต่การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเกิดการระเหิดของน้ำแข็งที่กระจายทั่วไปอยู่ในเซลล์ของผักผลไม้ จึงน่าจะมีส่วนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีความสม่ำเสมอมากกว่าวิธีอื่น โดยเมื่อสังเกตที่ชิ้นกล้วยจะมีลักษณะค่อนข้างเรียบ ไม่ขรุขระ

3) ปริมาตร

ปริมาตร (ซม³) ของชิ้นกล้วยและข้าวเหนียวถูกวัดก่อนและหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเพื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร (ร้อยละ) พบว่า ชิ้นกล้วยทั้ง 3 ชนิด และข้าวเหนียวมีปริมาตรเพิ่มสูงขึ้นภายหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมมีปริมาตรที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 64.72 และ 69.94 ตามลำดับ ส่วนกล้วยไข่มีปริมาตรเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 18.59 ($p < 0.05$) ในขณะที่ จารูวรรณ กุลวิศว (2550) และ Jiang *et al.* (2010) รายงานการหดตัวของปริมาตรของกล้วยหอมแผ่น ทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งว่าเกิดการหดตัวลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การทำแห้งหรือการอบแห้งด้วยวิธีการอื่นๆ กล้วยหอมแผ่น ทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเกิดการหดตัวของปริมาตรเท่ากับร้อยละ 27.79 (จารูวรรณ กุลวิศว, 2550) ส่วนกล้วยหอมเคาน์ดซ์แผ่นที่ทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะมีอัตราส่วนการขยายตัว (expansion

ratio = ปริมาตรหลังทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง/ปริมาตรก่อน ทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง) เพิ่มขึ้น 1.21 เท่า ถ้าทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งร่วมกับการใช้ไมโครเวฟ การทำแห้งกล้วยแบบแช่เยือกแข็งอย่างเดียวจะส่งผลทำให้เกิดการหดตัวของชิ้นกล้วย (Jiang *et al.*, 2010) Krokida and Maroulis (1997) กล่าวว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและความหนาของผลิตภัณฑ์หลังการทำแห้งนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น รูปทรง ลักษณะ อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนา วิธีการและสภาวะที่ใช้ในการทำแห้ง Moreira *et al.* (2000) พบว่าการหดตัวของปริมาตรยังขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น ถ้าความชื้นน้อยจะเกิดการหดตัวด้านเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่าด้านความหนา ในทางกลับกันถ้าความชื้นสูงการหดตัวด้านความหนาจะเกิดขึ้นเร็วกว่าด้านเส้นผ่าศูนย์กลาง

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของกล้วยทั้ง 3 ชนิดที่เกิดขึ้นดัง Table 3 เป็นไปได้ว่าน่าจะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนาดัง Table 2 โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นกล้วยที่เพิ่มมากขึ้นภายหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่เพิ่มขึ้นคล้ายเกิดการพองตัว (puffing) ของชิ้นกล้วย นอกจากนี้ โครงสร้างจุลภาคของกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมดัง Figure 2 จะมีโครงสร้างที่มีความเป็นรูพรุนภายในมากกว่ากล้วยไข่ ซึ่งมีรูพรุนน้อยกว่าสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของกล้วยไข่ที่เกิดขึ้นน้อยกว่ากล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมดัง Table 3

Table 3 Volume (cm³) of banana and sticky rice components of Kao Tom Mud snack before and and freeze drying and volume changes (%)

Component	Volume (cm ³)		Volume changes (%)
	Before	After	
Banana			
Khai	2.6±0.4	3.2±0.3	+18.59 ^b
Namwa	4.1±0.3	6.8±0.1	+64.72 ^a
Hom	5.2±0.1	8.8±0.3	+69.94 ^a
Rice			
Sticky rice	5.7±0.6	6.0±0.5	+6.01

^{ab} Means in the same column within the group (i.e. Banana group) with different letters are statistically different ($p < 0.05$)

4) โครงสร้างจุลภาค

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างภายในของกล้วย 3 ชนิด กล้วยไข่ กล้วยน้ำว้า และกล้วยหอมที่ผ่านการทำแห้งแบบ

แช่เยือกแข็งด้วยเครื่อง SEM ดังแสดงใน Figure 2 โดยรูปทางด้านซ้ายกำลังขยาย 50 เท่า รูปทางด้านขวากำลังขยาย 150 เท่า พบว่า ภาพตัดขวางที่กำลังขยาย 50 เท่า โครงสร้าง

ภายในของกล้วยทั้ง 3 ชนิดจะมีลักษณะคล้ายกัน คือ มีรูพรุนขนาดเล็กกระจายตัวทั่วไป แต่เมื่อกำลังขยายมากขึ้นเป็น 150 เท่าจะเห็นถึงความแตกต่างของโครงสร้างภายในของกล้วยทั้ง 3 ชนิด ชัดเจนมากขึ้น โดยกล้วยไข่ที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้นจะมีรูพรุนขนาดเล็กๆ กระจายทั่วบริเวณ รูพรุนมีลักษณะตื้นๆ ไม่ลึก ส่วนกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมพบรูพรุนที่

มีขนาดใหญ่กว่า โดยรูพรุนบางส่วนเชื่อมต่อกันทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ลึกลงไปในชั้นเนื้อ ลักษณะโครงสร้างภายในของกล้วยไข่ที่กำลังขยาย 50 เท่า พบว่า เหมือนกับกล้วยที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยการใช้เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งระดับห้องปฏิบัติการรายงานโดย Monteiro *et al.* (2016)

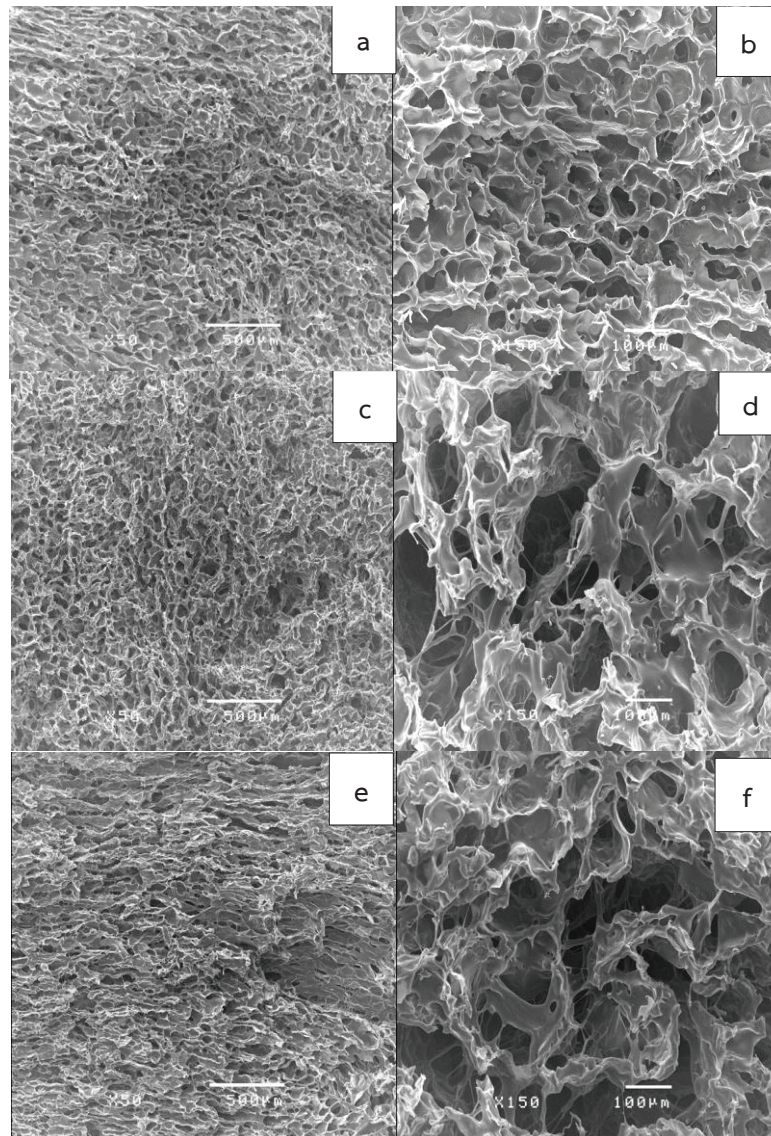


Figure 2 SEM Micrograph of microstructure of freeze-dried banana (a) “Khai” banana (magnification of 35x) ; (b) “Khai” banana (magnification of 150x) ; (c) “Namwa” banana (magnification of 35x) ; (d) “Namwa” banana (magnification of 150x) ; (e) “Hom” banana (magnification of 35x) ; (f) “Hom” banana (magnification of 150x)

ส่วนโครงสร้างภายในของกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมที่กำลังขยาย 150 เท่ามีลักษณะเช่นเดียวกับกล้วยที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งระดับอุตสาหกรรมและถ่ายภาพที่กำลังขยาย 50 เท่า (Monteiro *et al.*, 2016) ความแตกต่างของโครงสร้างภายในกล้วยที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลมาจากชนิดของ

เครื่องทำแห้ง สภาพการแช่แข็งและการทำแห้ง ชนิดของกล้วย คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของกล้วย หรือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำแห้ง

ในระหว่างกระบวนการทำแห้งเกิดการเปลี่ยนแปลงความชื้นของอาหารปริมาณของเหลวภายในโครงสร้างจะค่อยๆ ลดลงทำให้เกิดแรงดันคาพิลลารีซึ่งทำให้เกิดความเครียดใน

ส่วนของวัสดุที่เป็นของแข็ง (solid matrix) ซึ่งจะอัดและเปลี่ยนรูปร่างเซลล์ ทำให้เกิดการเหี่ยวและหดตัว อย่างไรก็ตามการทำแห้งบางวิธีเช่น microwave multi-flash drying process ที่ในกระบวนการมีการระเหยของน้ำออกอย่างรวดเร็วในสภาวะสุญญากาศเป็นช่วงๆ ทำให้เกิดการขยายตัวของก๊าซและทำให้เกิดโครงสร้างที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น ความหนาแน่นลดลงและการหดตัวของผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นไม่มากนัก ซึ่งลักษณะดังกล่าวที่มานี้เกิดขึ้นกับกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมในการทดลองครั้งนี้ดังแสดงใน Figure 2 ที่พบโครงสร้างที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ Monteiro *et al.* (2016) ได้รายงานค่าความหนาแน่น (apparent density) ของกล้วยทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง 2 ชนิดคือเครื่องทำแห้งระดับห้องปฏิบัติการและระดับอุตสาหกรรมไว้ว่ามีค่าเท่ากับ 0.679 และ 0.495 กรัม/ซม³ ตามลำดับ ในขณะที่กล้วยสดที่มีความหนาแน่น 1.04 กรัม/ซม³ นอกจากนี้ยังได้รายงานความเป็นรูพรุนของกล้วยทำแห้งโดยเครื่องทำแห้งระดับห้องปฏิบัติการและระดับอุตสาหกรรมเท่ากับร้อยละ 51.2 และ 66.1 เปรียบเทียบกับกล้วยสดที่มีความเป็นรูพรุนเพียงร้อยละ 11.6

5) เนื้อสัมผัส

จากการวัดค่าความแน่นเนื้อของกล้วยสดก่อนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่า กล้วยน้ำว้ามีความแน่นเนื้อมากที่สุดเท่ากับ 90.56 กรัม ($p < 0.05$) ส่วนกล้วยไข่และกล้วยหอมมีความแน่นเนื้อเท่ากับ 39.55 และ 39.03 กรัม ($p > 0.05$) เนื่องจากกล้วยน้ำว้ามีลักษณะเนื้อที่ค่อนข้างแน่น เนื้อส่วนกล้วยไข่และกล้วยหอมมีเนื้อสัมผัสที่มีความนุ่ม แน่นแต่น้อยกว่ากล้วยน้ำว้า ความแน่นเนื้อที่แตกต่างกันน่าจะเป็นผลมาจากปริมาณแป้งและสารประกอบเพกตินของกล้วยกล้วยน้ำว้าในระยะสุกมีปริมาณแป้งเท่ากับร้อยละ 3.9 มากกว่ากล้วยหอมและกล้วยไข่ที่มีปริมาณแป้งร้อยละ 1.4 และ 0.9 ตามลำดับ (พรฤดี ศรีปทุมรักษ์, 2547) ภายหลังจากนำขึ้นกล้วยทั้ง 3 ชนิดไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งแล้ววัดความแข็ง/ความกรอบพบว่ากล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะมีความแข็งมากกว่ากล้วยหอม ($p < 0.05$) โดยแรงที่ใช้ในการกดให้ขึ้นกล้วยเกิดการแตกออกมีค่ามากกว่ากล้วยหอม หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่ากล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีความกรอบน้อยกว่ากล้วยหอมที่ใช้แรงในการกดให้แตกออกน้อยกว่าดัง Table 4

สมบัติทางโครงสร้างเช่น ความหนาแน่น และความเป็นรูพรุนมีผลต่อเนื้อสัมผัสและคุณภาพของอาหารอบแห้ง Scaman *et al.* (2014) กล่าวว่า ลักษณะเนื้อสัมผัสที่เป็นความกรอบเป็นผลมาจากโครงสร้างที่มีรูพรุนที่เกิดจากโพรงอากาศล้อมรอบด้วยโครงสร้างที่มีความเปราะบางแตกหักง่าย ซึ่งจากโครงสร้างภายใน SEM ของกล้วยทั้ง 3 ชนิดดัง Figure 2 จะพบว่า ภายหลังจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะมีลักษณะเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุน จึงทำให้ได้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่มีความกรอบ ความกรอบของกล้วยภายหลังจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรดัง Table 3 กล้วยหอมที่มีความกรอบมากที่สุดหรือความแข็งน้อยที่สุด 358.13 กรัม พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่สูงเช่นกันร้อยละ 69.94 กล้วยไข่ที่มีความกรอบน้อยที่สุดหรือความแข็งมากที่สุด 524.49 กรัม พบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรมีค่าต่ำที่สุดร้อยละ 18.59 ส่วนกล้วยน้ำว้ามีความกรอบไม่แตกต่างจากกล้วยไข่ ($p > 0.05$) แต่การเปลี่ยนแปลงปริมาตรแตกต่างจากกล้วยไข่อย่างชัดเจนนั้น (ร้อยละ 64.72 VS. 18.59) ส่วนหนึ่งอาจจะเป็นผลมาจากความแน่นเนื้อของกล้วยน้ำว้าสดที่มีค่าสูงที่สุด ซึ่งความแน่นเนื้อของกล้วยแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี เช่น แป้ง และคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่นๆ ที่พบในผนังเซลล์ เช่น สารประกอบเพกติน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส (พรฤดี ศรีปทุมรักษ์, 2547 ; จริ่งแท้ ศิริพานิช, 2549)

ส่วนข้าวเหนียวพบว่ามีค่าความแข็งเท่ากับ 6005.40 กรัม มากกว่ากล้วยประมาณ 10 เท่าอาจเนื่องมาจากความแตกต่างของรูปร่างลักษณะที่กล้วยมีลักษณะเป็นชิ้นแผ่นบางๆ หนาประมาณ 3.8-4.5 มม. ส่วนข้าวเหนียวมีความหนา 6.9 มม. ประกอบด้วยเมล็ดข้าวที่ทับซ้อนกันหลายชั้น และเมื่อแป้งเกิดการรีโทรเกรเดชันอาจมีผลทำให้มีความแข็งมากกว่า นอกจากนี้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งซึ่งมีส่วนประกอบทั้งชิ้นกล้วยและข้าวเหนียวพบว่า ผลิตภัณฑ์มีความแข็งมากขึ้นกว่าส่วนของส่วนประกอบที่เป็นชิ้นกล้วยและส่วนข้าวเหนียวดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น โดยผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดทั้งชิ้นมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 11,656.26-15,189.87 กรัม ($p > 0.05$) ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์พรีสตรายที่มีข้าวเหนียวเป็นส่วนประกอบที่คล้ายกันกับข้าวต้มมัดคือ ข้าวเหนียวมูนทุเรียนพรีสตราย มีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 250.81-287.42 นิวตัน หรือ 25,575.09-29,308.22 กรัม (สนทนกานต์ คุณเอนก และคณะ, 2565)

Table 4 Firmness and hardness of Freeze-dried Kao Tom Mud snack and its components

Component	Firmness (g force)	Hardness (g force)
	Before	After
Banana		
Khai	39.55±5.85 ^b	524.49±88.90 ^a
Namwa	90.56±11.10 ^a	507.13±137.95 ^{ab}
Hom	39.03±4.09 ^b	358.13±98.52 ^c
Rice		
Sticky rice	NA	6005.40±1978.54
Kao Tom Mud snack		
Khai	NA	12571.61±3258.15 ^{ns}
Namwa	NA	15189.87±1591.94
Hom	NA	11656.26±1303.58

^{ab} Means in the same column within the group (i.e. Banana or Kao Tom Mud snack group) with different letters are statistically different ($p < 0.05$)

^{ns} Means in the same column within the group (i.e. Banana or Kao Tom Mud snack group) are not statistically different ($p > 0.05$)

คุณภาพทางเคมี

1) ค่าความชื้นและ a_w

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีผลทำให้ปริมาณความชื้นของกล้วย ข้าวเหนียว และผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดเกิดการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างชัดเจนเนื่องจากน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ถูกระเหิดออกในขั้นตอนการทำแห้ง โดยกล้วยก่อนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 71.46-76.89 ($p < 0.05$) ภายหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งความชื้นลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 2.18-2.72 ($p < 0.05$) ลดลงประมาณร้อยละ 96.2-96.5 ข้าวเหนียวมีความชื้นก่อนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเท่ากับร้อยละ 34.50 ภายหลังการทำแห้งความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 1.48 ลดลงคิดเป็นร้อยละ 95.7 ส่วนผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดก่อนการทำแห้งมีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 47.60-49.68 ($p > 0.05$) ภายหลังการทำแห้งมีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 2.35-2.37 ลดลงคิดเป็นร้อยละ 95.1-95.2

จะเห็นได้ว่า การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งในการศึกษาครั้งนี้มีผลทำให้ปริมาณความชื้นลดลงประมาณร้อยละ 95-96 โดยทั่วไปการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งไม่ได้มีการกำหนดมาตรฐานปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์จึงพบข้อมูลความชื้นที่แตกต่างกันตั้งแต่ร้อยละ 0.5 (แอปเปิ้ล) ร้อยละ 2.09

(ข้าว) ร้อยละ 5 (ข้าวเหนียวมูนทุเรียนฟรีสตรราย) จนถึงร้อยละ 9.87 (แก้วมังกร) (สมณฑานต์ คุณเอนก และคณะ, 2565 ; Nowak & Jakubczyk, 2020)

นอกจากนี้การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งยังมีผลทำให้ค่า a_w ลดลงเช่นกันโดยค่า a_w ของกล้วยลดลงอยู่ในช่วง 0.173-0.197 ($p > 0.05$) ค่า a_w ของข้าวเหนียวเท่ากับ 0.422 และค่า a_w ของผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดมีค่าอยู่ในช่วง 0.169-0.181 ($p > 0.05$; Table 5) Morega *et al.* (2011) พบว่า เมื่อค่า a_w ของกล้วยคาเวนดิชที่ทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสูงกว่า 0.43 สังเกตพบการเปลี่ยนแปลงสีของกล้วยโดยเฉพาะอย่างยิ่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเพิ่มสูงขึ้นชัดเจน

ค่า critical a_w ของกล้วยคาเวนดิชทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งควรมีค่าอยู่ในช่วง 0.23-0.26 เพื่อป้องกันไม่ให้สมบัติเชิงแสง ได้แก่ สี และสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไปโดยการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพที่ไม่พึงประสงค์ที่อาจเกิดขึ้นคือ เกิดการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (glassy state) กลายเป็นสถานะของเหลวหนืดคล้ายยาง (rubbery state) หรือที่เรียกว่า glass transition ภายใต้สภาวะการเก็บรักษาที่ไม่เหมาะสม ทำให้ความกรอบของผลิตภัณฑ์ลดลง

Table 5 Water activity (a_w) and moisture content (%) of Kao Tom Mud snack and its components before and after freeze drying

Component	Moisture content (%)		a_w	
	Before	After	Before	After
Banana				
Khai	71.46±0.71 ^b	2.72±0.02 ^a	0.978±0.002 ^{ab}	0.197±0.009 ^{ns}
Hom	76.78±0.86 ^a	2.18±0.13 ^c	0.976±0.002 ^b	0.173±0.013
Namwa	76.89±0.37 ^a	2.43±0.10 ^b	0.980±0.001 ^a	0.193±0.018
Rice				
Sticky rice	34.50±1.16	1.48±0.07	0.941±0.002	0.422±0.004
Kao Tom Mud Snack				
Khai	47.60±0.43 ^{ns}	2.35±0.13 ^{ns}	0.965±0.001 ^c	0.173±0.022 ^{ns}
Namwa	49.68±1.89	2.40±0.03	0.968±0.001 ^b	0.181±0.033
Hom	48.68±0.31	2.37±0.09	0.973±0.001 ^a	0.169±0.001

^{ab} Means in the same column within the group (i.e. Banana or Kao Tom Mud snack group) with different letters are statistically different ($p<0.05$)^{ns} Means in the same column within the group (i.e. Banana or Kao Tom Mud snack group) are not statistically different ($p>0.05$)**Table 6** pH of Kao Tom Mud snack and its components before and after freeze drying

Component	pH		Brix
	Before	After	
Banana			
Khai	4.94±0.01 ^b	5.32±0.01 ^a	28.80±0.2 ^a
Namwa	4.63±0.02 ^b	4.82±0.03 ^c	28.10±0.1 ^b
Hom	4.92±0.02 ^a	4.91±0.02 ^b	23.13±0.1 ^c
Rice			
Sticky rice	6.07±0.01	6.36±0.13	NA
Kao Tom Mud snack			
Khai	5.31±0.01 ^b	5.41±0.01 ^a	NA
Namwa	5.11±0.01 ^c	5.12±0.04 ^b	NA
Hom	5.35±0.01 ^a	5.15±0.02 ^b	NA

^{ab} Means in the same column within the group (i.e. Banana or Kao Tom Mud snack group) with different letters are statistically different ($p<0.05$)^{ns} Means in the same column within the group (i.e. Banana or Kao Tom Mud snack group) are not statistically different ($p>0.05$)

2) ค่า pH และ Brix

ค่า pH ของกล้วยสดทั้ง 3 ชนิดมีค่าอยู่ในช่วง 4.63-4.94 pH ข้าวเหนียวเท่ากับ 6.07 และ pH ของผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดที่ทำจากกล้วย 3 ชนิดมีค่าอยู่ในช่วง 5.11-5.31 ภายหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งพบว่า ทั้งหมดมีค่า pH แนวนอนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (Table 6) ส่วนค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของกล้วยเรียงลำดับดังนี้ กล้วยไข่ กล้วยน้ำว้า และ

กล้วยหอม ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ใช้วัดค่าความหวานของกล้วยมีองค์ประกอบของน้ำตาลหลัก 3 ชนิดคือ น้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และซูโครส แปรผันตามระยะการสุก (จริงแท้ศิริพานิช, 2549) ในการศึกษาครั้งนี้ใช้กล้วยไข่ในระยะสุกที่ทั้งผลมีสีเหลืองโดยกล้วยไข่จัดอยู่ในระยะสุกที่ 5 กล้วยน้ำว้า และกล้วยหอมอยู่ระยะสุกที่ 6

คุณภาพทางประสาทสัมผัส

จากการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ทำจากกล้วย 3 ชนิด กล้วยไข่ กล้วยน้ำว้า และกล้วยหอม พบว่า ผู้ทดสอบให้คะแนนการยอมรับผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ทำจากกล้วยไข่น้อยกว่าที่ทำจากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมในทุกคุณลักษณะได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส ความกรอบ และความชอบรวม ($p < 0.05$; Figure 3) เนื่องจากลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดที่ทำจากกล้วยไข่ในส่วนของชั้นกล้วยที่อยู่ด้านบนของผลิตภัณฑ์เกิดการหดตัวมากกว่ากล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม จึงทำให้ส่วนของข้าวเหนียวด้านล่างปรากฏต่อสายตามากกว่า ต่างจากที่ทำจากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม

ที่ขนาดของชั้นกล้วยจะใกล้เคียงกับชั้นข้าวเหนียวด้านล่าง อีกทั้งชั้นกล้วยไข่ยังมีลักษณะแบนส่วนกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมจะมีความพองมากกว่า จึงมีผลทำให้คะแนนการยอมรับของข้าวต้มมัดทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ทำจากกล้วยไข่น้อยกว่าที่ทำจากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม ($p < 0.05$)

นอกจากนี้คุณลักษณะทางด้านสี พบว่า ข้าวต้มมัดทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ทำจากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมมีสีขาวเหลืองสว่างกว่า ในขณะที่ส่วนที่ทำจากกล้วยไข่จะมีสีเหลืองอ่อนและส่วนใหญ่ปรากฏเป็นเส้นสีดำๆ กระจายอยู่ทั่วไปในส่วนของเนื้อกล้วย (Figure 1) ทำให้ดูไม่น่ารับประทาน ทำให้คะแนนการยอมรับข้าวต้มมัดทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ทำจากกล้วยไข่ต่ำกว่าที่ทำจากกล้วยหอมและกล้วยน้ำว้า ($p < 0.05$)

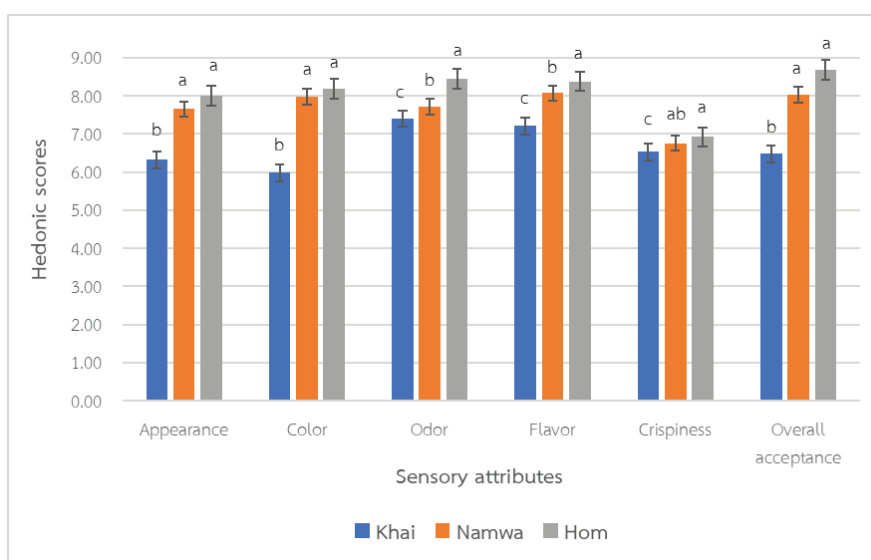


Figure 3 Sensory acceptance scores of Khai, Namwa, and Hom banana freeze-dried Kao Tom Mud snack. Different letters (above each bar) indicate a significant difference between mean of each sample ($p < 0.05$).

คุณลักษณะทางด้านกลิ่นรส พบว่า ข้าวต้มมัดทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ทำจากกล้วยหอมได้คะแนนการยอมรับด้านรสชาติมากกว่ากล้วยน้ำว้าและกล้วยไข่ ($p < 0.05$) ผู้ทดสอบให้ข้อมูลว่า ผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดที่ทำจากกล้วยหอมมีกลิ่นกล้วยมากกว่าข้าวต้มมัดที่ทำจากกล้วยน้ำว้าและกล้วยไข่ จากการศึกษารสให้กลิ่นในกล้วยของ ภาสวัน คูหา (2560) พบว่า สารให้กลิ่นในกล้วยหอมทองมีจำนวน 23 สาร ส่วนกล้วยน้ำว้ามีสารให้กลิ่น 5 สาร ส่วนในกล้วยไข่ไม่พบข้อมูล สอดคล้องกับ สมฤดี ไทพาณิชย์ (2550) พบว่า ในกล้วยหอมมีสารให้กลิ่นที่ระเหยได้จำนวน 17 ชนิด โดยชนิดของสารให้กลิ่นจะแตกต่างกันไปตามระยะการสุก สารประกอบที่ระเหยได้ในกล้วยทำแห้งด้วยวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือสูญเสียเมื่อเปรียบเทียบกับ

การทำแห้งแบบวิธีอื่นเช่น วิธี vacuum belt drying และการทำแห้งแบบใช้ลมร้อน (air drying) โดยสารประกอบที่ระเหยได้ของผักและผลไม้ทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะถูกกักเก็บไว้ในบริเวณเล็กๆ (microregion) จะเกิดการสูญหายไปเมื่อผักและผลไม้ที่ผ่านการทำแห้งแล้วเกิดการดูดซับน้ำหรือความชื้นซึ่งทำให้การซึมผ่านหรือแพร่ผ่านบริเวณส่วนแห้งนั้นเพิ่มขึ้น Wang *et al.* (2007) นอกจากนี้ยังพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากกล้วยทั้ง 3 ชนิดมีรสชาติหวานแต่ที่ทำจากกล้วยไข่จะมีความฝาดเปรี้ยว และมีความขมเล็กน้อยภายหลังการกลืน ค่า pH ของผลิตภัณฑ์มีค่าอยู่ในช่วง 5.12-5.41 (Table 6)

คุณลักษณะทางด้านเนื้อสัมผัส พบว่า ข้าวต้มมัดทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ทำจากกล้วยทั้ง 3 ชนิดได้รับคะแนน

การยอมรับแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) ข้าวต้มมัดแช่เยือกแข็งที่ทำจากกล้วยหอมและกล้วยน้ำว้าได้คะแนนเนื้อสัมผัสไม่แตกต่างกันและมากกว่ากล้วยไข่ ค่าคะแนนการยอมรับใกล้เคียงกันสัมพันธ์กับค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ (Table 4) พบว่าผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดแช่เยือกแข็งที่ทำจากกล้วยทั้ง 3 ชนิดมีค่าความแข็งไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) ด้านความชอบโดยรวมของผลิตภัณฑ์พบว่า ข้าวต้มมัดแช่เยือกแข็งทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ทำจากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมได้คะแนนการยอมรับด้านความชอบรวมสูงกว่ากล้วยไข่ ($p < 0.05$) โดยมีคะแนนการยอมรับเท่ากับ 8.02 และ 8.68 ซึ่งมากกว่ากล้วยไข่ที่มีคะแนนการยอมรับรวมเท่ากับ 6.48 คะแนน

สรุปผลการทดลอง

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดให้อยู่ในรูปแบบข้าวต้มมัดแช่เยือกแข็งโดยการใช้การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีผลต่อคุณภาพทางเคมี กายภาพ และประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดแช่เยือกแข็งที่ทำจากกล้วย 3 ชนิดคือ กล้วยไข่ กล้วยน้ำว้า กล้วยหอม โดยพบว่า การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีผลทำลายสีเหลือง (ค่า b^*) ของกล้วยมากกว่าค่า L^* และค่า a^* สีของกล้วยมีสีเหลืองซีดลง ปริมาตรของส่วนชิ้นกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมเพิ่มขึ้นเมื่อวิเคราะห์โครงสร้างภายในของกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมจะพบรูพรุนขนาดใหญ่กว่าของกล้วยไข่ ซึ่งส่งอิทธิพลต่อเนื้อสัมผัสของชิ้นกล้วย หากวัดเฉพาะชิ้นกล้วยพบว่ากล้วยหอมมีความแข็งมากกว่ากล้วยน้ำว้าและกล้วยไข่ แต่ความแข็งของผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดแช่เยือกแข็งไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) เนื้อสัมผัสจะมีความแน่นแข็งเป็นผลมาจากส่วนของข้าวเหนียวที่อยู่ด้านล่าง ผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดแช่เยือกแข็งที่ได้มีปริมาณความชื้นต่ำร้อยละ 2.35-2.40 และค่า a_w ต่ำ 0.169-0.181 จากการทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสพบว่า ผู้ทดสอบให้คะแนนการยอมรับโดยรวมผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดทำจากกล้วยหอมและกล้วยน้ำว้าสูงกว่ากล้วยไข่ ($p > 0.05$)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะกรรมการจัดการธุรกิจอาหาร สถาบันปัญญาภิวัฒน์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวัดเนื้อสัมผัส

เอกสารอ้างอิง

จรัสแท้ ศิริพานิช. (2549). *สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้* (พิมพ์ครั้งที่ 6). สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จารุวรรณ กุลวิศ. (2550). ผลของวิธีการอบแห้งที่มีต่อสารระเหยง่ายและคุณภาพทางกายภาพของกล้วยแผ่น. *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*.

จินดา ศรศรีวิชัย. (2541). การใช้คอมพิวเตอร์โมเดลเพื่อพัฒนาบรรจุภัณฑ์สำหรับยืดอายุการเก็บรักษากล้วยไข่ในสภาพดัดแปลงบรรยากาศ (ระยะที่ 1): รายงานโครงการวิจัยมหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ทีเอ็นเอ็นออนไลน์. (2566, 12 กรกฎาคม). กล้วยหอมไทยผลไม้ยืนหนึ่ง ราคาสูง ผลไม้เศรษฐกิจที่สำคัญที่มียอดการส่งออกมากเป็นลำดับต้นๆ. <https://www.tnnthailand.com/news/infographic/150930/>

เบญจมาศ ศิลาอ้อย. (2538). *กล้วย* (พิมพ์ครั้งที่ 2). สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พรฤดี ศรีปทุมรักษ์. (2547). ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาลกับค่าดัชนีน้ำตาลของผลไม้ไทย. *วิทยานิพนธ์เภสัชศาสตรมหาบัณฑิต สาขาอาหารเคมีและโภชนาศาสตร์* ทางแพทย์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาสวัน คูหา. (2560). การเปรียบเทียบสารให้กลิ่นจากกล้วยสายพันธุ์ต่างๆ. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สนทกานต์ คุณเอนก, วันวิสาข์ โพธิ์ใหญ่, วิรัชชานา ฤทธิบุตร, วรชชนม์ นิลนนท์ และเกสริน, ถังเงิน. (2565). การศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณแป้งและความหวานของทุเรียนหมอนทองในช่วงระยะเวลาการบ่มสุก และการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเหนียวมูนทุเรียนฟรีสตรราย. *รายงานผลโครงการงานการปฏิบัติสหกิจศึกษา สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี*.

สมฤดี ไทพานิชย์. (2550). กระบวนการทางเอนไซม์สำหรับแปรรูปไซรัปกล้วยหอม *Musa acuminata* AAA group "Gros Michel" เพื่อเป็นอาหารที่มีหน้าที่เฉพาะ. *วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*.

สำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ. (2566, 1 กรกฎาคม). โอกาสกล้วยไทยสู่อินเตอร์. <https://www.ditp.go.th/post/132425>

AOAC. (2000). *Official method of analysis* (17th ed.). The Association of Official Analytical Chemists.

Bhatta, S., Janezic, T.S., & Ratti, C. (2020). Freeze-drying of plant-based food. *Foods*, 9(1), 87. <https://doi.org/10.3390/foods9010087>

- CSIRO. (1972). *Banana ripening guide*. Volume 8 of Division of Food Research Circular. Commonwealth Scientific Institute and Research Organization.
- Jiang, H., Zhang, M., & Mujumdar, A.S. (2010). Physico-chemical changes during different stages of MFD/FD banana chips. *Journal of Food Engineering*, 10(2), 140-145. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.06.002>
- Krokida, M.K., Karathanos, V.T., & Maroulis, Z.B. (1998). Effect of freeze-drying conditions on shrinkage and porosity of dehydrated agricultural products. *Journal of Food Engineering*, 35, 369-380.
- Krokida, M.K., & Maroulis, Z.B. (1997). Effect of drying method on shrinkage and porosity. *Drying Technology*, 15, 2441-2458. <https://doi.org/10.1080/07373939708917369>
- Krokida, M.K., Maroulis, Z.B., & Saravacos, G.D. (2001). The effect of the method of drying on the colour of dehydrated product. *International Journal of Food Science and Technology*, 36, 53-59. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2001.00426.x>
- Milani, A., Jouki, M., & Rabbani, M. (2020). Production and characterization of freeze-dried banana slices pretreated with ascorbic acid and quince seed mucilage: physical and functional properties. *Food Science and Nutrition*, 8, 3768-3776. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1666>
- Monteiro, R., Carciofi, B.A.M., & Laurindo, J.B. (2016). A microwave multi-flash drying process for producing crispy banana. *Journal of Food Engineering*, 178, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.12.024>
- Morega, G., Talens, P., Morega, M.J., & Martinez-Narvarete, N. (2011). Implication of water activity and glass transition on the mechanical and optical properties of freeze-dried apple and banana slices. *Journal of Food Engineering*, 106, 212-219. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.05.009>
- Moreira, R., Figueireidi, A., & Sereno, A. (2000). Shrinkage of apple disks during drying by warm air convection and freeze drying. *Drying Technology*, 18(1-2), 279-294. <https://doi.org/10.1080/07373930008917704>
- Nowak, D., & Jakubczyk, E. (2020). The freeze-drying of foods—the characteristic of the process course and the effect of its parameters on the physical properties of food materials. *Foods*, 9(10), 1488. <https://doi.org/10.3390/foods9101488>
- Oikonomopoulou, V.P., Krokida, M.K., & Karathanos, V.T. (2011). The influence of freeze-drying conditions on microstructural changes of food product. *Procedia Food Science*, 1, 647-654. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.097>
- Serna-Cock, L., Vargas-Munoz, D.P., & Aponte, A.A. (2015). Structural, physical, functional and nutraceutical changes of freeze-dried fruit. *African Journal of Biotechnology*, 14(6), 442-450. <https://doi.org/10.5897/AJB2014.14189>
- Scaman, C.H., Durance, T.D., Drummond, L., & Sun, D.-W. (2014). Combined microwave vacuum drying. In D.-W. Sun (Ed.), *Emerging technologies for food processing* (2nd ed., pp. 1-18). Academic Press.
- Shukla, S. (2011). Freeze drying process: A review. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 2(12), 3061-3068.
- Swasdisevi, T., Devahastin, S., Ngamchum, R., & Soponronnarit, S. (2007). Optimization of a drying process using infrared-vacuum drying of Cavendish banana slices. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 29(3), 809-816.
- Valentina, V., Pratiwi, A.R., Hsiao, P.Y., Tseng, H.T., Hsieh, J.F., & Chen, C.C. (2016). Sensorial characterization of foods before and after freeze-drying. *Austin Food Science*, 1(6), 1-5.
- Wang, J., Li, Y.Z., Chen, R.R., Bao, J.Y., & Yang, G.M. (2007). Comparison of volatile of banana powder dehydrated by vacuum belt drying, freeze drying, and air drying. *Food Chemistry*, 104(4), 1516-1521. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.02.029>