วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ปีที่ 28 (ฉบับที่ 2) พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2566
BURAPHA SCIENCE JOURNAL Volume 28 (No.2) May – August 2023 บทความวิจัย

ผลของวิธีการละลายน้ำแข็งต่อคุณภาพของมะม่วงแก้วขมิ้นสุกแช่แข็ง

Effect of Thawing Methods on Quality of Frozen Ripe Kaew Kamin Mango

ธวัลรัตน์ สัมฤทธิ์[1*], วรลักษณ์ สุริวงษ์[1], พัชราภรณ์ อินริราย[1], สุรินทราพร แสวงงาม[1], อารยา บุญศักดิ์[2] และ ญาณิศา จินดาหลวง[3]

Thawanrat Sumrit[1*], Voraluck Suriwong[1], Patcharaporn Inrirai[1], Surintraporn Swaeng-ngam[1],
Araya Bunsak[2] and Yanisa Chindaluang[3]

[1] *สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม*

[2] *สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม*

[3] *สาขาวิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพและเครื่องสำอาง คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม*

[1]*Food Engineering, Faculty of Food and Agricultural Technology, Pibulsongkram Rajabhat University*

[2]*Agriculture, Faculty of Food and Agricultural Technology, Pibulsongkram Rajabhat University*

[3]*Health and Cosmetic Product Development, Faculty of Food and Agricultural Technology, Pibulsongkram Rajabhat University*

Received : 8 November 2022
Revised : 9 January 2023
Accepted : 24 January 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการแช่แข็งของเนื้อมะม่วงแก้วขมิ้นสุก และผลของการละลายน้ำแข็งด้วยกระบวนการละลายผ่านน้ำ การละลายผ่านอากาศ และการละลายด้วยอินฟราเรดต่อคุณภาพของมะม่วงแก้วขมิ้นภายหลังการละลายน้ำแข็ง โดยการนำเนื้อมะม่วงสุกไปผ่านการแช่แข็งแบบช้าที่อุณหภูมิ -38 องศาเซลเซียส ด้วยตู้แช่แข็งอุณหภูมิต่ำ เป็นระยะเวลา 156±2.64 นาที อัตราการแช่แข็งเท่ากับ 0.27±0.05 องซาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นนำตัวอย่างมาละลายน้ำแข็ง 3 วิธี ผลการทดลองพบว่า วิธีการละลายผ่านน้ำ การละลายผ่านอากาศ และการละลายด้วยอินฟราเรดกำลังไฟฟ้า 250 วัตต์ ใช้เวลาในการละลายเนื้อมะม่วงแช่แข็ง เท่ากับ 15, 25 และ 8 นาที ตามลำดับ เนื้อมะม่วงมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการละลายเท่ากับ ร้อยละ 3.09±0.14, 4.05±0.43 และ 2.34±0.36 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ คุณภาพด้านสี มีค่า L^* (ค่าความสว่าง) เท่ากับ 44.27±1.21, 44.22±0.00 และ 44.56±0.00 ค่าสี a^* (ค่าความเป็นสีแดง) เท่ากับ 2.6±30.01, 2.58±0.00 และ 2.62±0.01 และค่าสี b^* (ค่าความเป็นสีเหลือง) เท่ากับ 33.83±0.02, 31.81±0.01 และ 33.82±0.00 ตามลำดับ รวมทั้งมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 4.96±0.00, 4.93±0.00 และ 5.08±0.11 ตามลำดับ ค่าความหวาน เท่ากับ 11.53±0.06, 11.23±0.05 และ 11.86±0.05 องศาบริกซ์ ค่าความแน่นเนื้อหลังการละลายน้ำแข็ง เท่ากับ 1.40±0.57, 1.70±0.63 และ 2.27±0.27 นิวตัน ตามลำดับ ซึ่งการละลายด้วยอินฟราเรด ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเนื้อมะม่วงสุกแช่แข็งน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างก่อนแช่แข็ง โดยค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงสุกหลังการละลายน้ำแข็งลดลงจากตัวอย่างมะม่วงสดก่อนการแช่แข็งร้อยละ 64.02 นอกจากนี้จากการทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่า เนื้อมะม่วงสุกหลังการละลายน้ำแข็งด้วยอินฟราเรดได้รับคะแนนความชอบโดยรวมสูงสุด (7.40±0.51 คะแนน) ซึ่งมีความแตกต่างจากตัวอย่างอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

คำสำคัญ : เนื้อมะม่วงสุก ; การละลายน้ำแข็ง ; การสูญเสียน้ำหนักหลังการละลาย ; อินฟราเรด

Abstract

The objectives of this research were to investigate the freezing of ripe kaew kamin mango pulp and the effect of thawing using water thawing, air thawing, and infrared thawing on the quality of the frozen ripe kaew kamin mango. The ripe mango flesh were slowly frozen at -38 °C in a chest deep freezer for 156±2.64 minutes, and the freezing rate was 0.27±0.05°C/min. Then, the samples were defrosted using three different techniques: water thawing, air thawing, and 250 watts of infrared thawing. The results showed that the thawing times were 15, 25, and 8 minutes, respectively. Weight losses of mango pulp after the thawing were 3.09±0.14, 4.05±0.43, and 2.34±0.36 % wt, respectively. In terms of color quality, the samples had *L** values (lightness) of 44.27±1.21, 44.22±0.00, and 44.56±0.00, the *a** values (redness) of 2.63±0.01, 2.58±0.00, and 2.62±0.01, and the *b** values (yellowness) were 33.83±0.02, 31.81±0.01, and 33.82±0.00, respectively. In addition, the pH values were 4.96, 4.93, and 5.08, respectively. The total soluble solids were 11.53±0.06, 11.23±0.05 and 11.86±0.05 °Brix, respectively. The firmness values after thawing were 1.40±0.57, 1.70±0.63, and 2.27±0.27 N, respectively. When compared to the fresh sample, infrared thawing had minimum effect on changes in the quality of frozen ripe mango, in which the firmness of ripe mangos after thawing was less than about 64.02%. Additionally, sensory evaluation showed that the ripe mango pulp after infrared thawing obtained the highest overall acceptability score (7.40±0.51 points), which was significant difference among the assessed samples.

Keywords : ripe mango pulp ; thawing ; drip loss; infrared

***Corresponding author. E-mail :** thawanrat.s@psru.ac.th

บทนำ

มะม่วง (*Mangoifera indica* L.) เป็นผลไม้เศรษฐกิจที่สำคัญของไทย ได้รับความนิยมสูงในต่างประเทศ มีคุณค่าทางโภชนาการสูง และมีสารสำคัญต่อร่างกายมนุษย์โดยมีวิตามินซี สารแคโรทีนอยด์ และมีสารเบต้า-แคโรทีน ที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระและเปลี่ยนเป็นวิตามินเอได้ในร่างกาย ในประเทศไทยนิยมปลูกมะม่วงในทุกภาค ทั่วทั้งประเทศ สามารถปลูกได้ตลอดทั้งปี โดยพันธุ์ที่นิยมปลูกเพื่อบริโภคผลสุก ได้แก่ แก้วขมิ้น น้ำดอกไม้ โชคอนันต์ และมหาชนก เป็นต้น เนื่องจากมะม่วงเป็นผลไม้ที่ให้ผลผลิตสูงตามฤดูกาล จึงทำให้ช่วงในฤดูกาลผลผลิตมีราคาต่ำ บางฤดูกาลมีมะม่วงเหลือทิ้งขายไม่ได้ราคา หากมีการนำผลผลิตมะม่วงไปเพิ่มมูลค่าโดยการแปรรูปหรือถนอมอาหารจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของผู้ประกอบการ สามารถเพิ่มช่องทางและโอกาสจำหน่ายในท้องตลาดได้ โดยทั่วไปแล้วการแปรรูปมะม่วงนิยมแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป เช่น มะม่วงแช่แข็ง และน้ำมะม่วงเข้มข้น เป็นต้น เพื่อนำไปประกอบอาหาร หรือผลิตภัณฑ์มะม่วงสำเร็จรูปพร้อมบริโภคทันที เช่น น้ำมะม่วงพร้อมดื่ม แยมมะม่วง และมะม่วงแช่อิ่ม เป็นต้น

มะม่วงแก้วขมิ้น เป็นมะม่วงที่อยู่ในวงศ์ ANACARDIACEAE มีถิ่นกำเนิดในประเทศกัมพูชา ลำต้นไม่สูงมากนัก มีผลรูปร่างทรงกลม ความยาวของผล 97-166 มิลลิเมตร และความกว้างของผล 61-60 มิลลิเมตร สามารถปลูกได้ในทุกสภาพดิน ออกผลตลอดทั้งปี ผลโตเต็มที่น้ำหนักเฉลี่ย 184-347 กรัม หรือ 2-3 ผล ต่อ 1 กิโลกรัม ผลดิบมีสีเขียวอ่อนและเนื้อมีสีเหลือง เมื่อสุกเปลือกจะมีสีเหลืองนวล ส่วนเนื้อมีสีเหลืองอมแดง ในประเทศไทยการปลูกมะม่วงแก้วขมิ้นพบเยอะในจังหวัดสิงห์บุรี ชัยนาท และอุทัยธานี นอกจากนี้ในมะม่วงแก้วขมิ้นผลสุกมีสารเบต้า-แคโรทีน 1.76 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม และวิตามินซี 35 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม นอกจากนี้ให้พลังงาน 93 กิโลแคลอรี และมีปริมาณเส้นใย 1.6 กรัมต่อ 100 กรัม ซึ่งเส้นใยมีประโยชน์ต่อร่างกาย ช่วยในการย่อยอาหาร และกระตุ้นการทำงานของระบบลำไส้ มีส่วนช่วยในการขับถ่าย ส่วนการรับประทานมะม่วงผลสุกจะได้รับวิตามินซีและสารเบต้า-แคโรทีน ช่วยในการต้านอนุมูลอิสระ บำรุงผิวพรรณ และบำรุงสายตา ช่วยลดระดับไขมันในเส้นเลือด รวมถึงปรับสมดุลระดับน้ำตาลในเลือดอีกด้วย (Jahurul *et al*., 2015; Mühlbauer & Müller, 2020)

ปัจจุบันวิธีการแช่แข็งเป็นวิธีถนอมอาหารอย่างหนึ่ง สามารถช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร คงไว้ซึ่งคุณค่าทางโภชนาการ และสามารถรักษาคุณภาพของอาหารได้มากที่สุด โดยการนำผลผลิตทางการเกษตรและอาหารหรือผลิตภัณฑ์อาหารมาลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า -18 องศาเซลเซียส ความเย็นจะช่วยชะลอการการทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ในผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าการแช่เย็น โดยในประเทศไทยมีผู้ประกอบการผลิตเนื้อมะม่วงสุกแช่แข็งเพื่อการส่งออกมากขึ้น ถือว่าเป็นทางเลือกของผู้บริโภคที่ต้องการเก็บรักษามะม่วงไว้ได้นานไม่เน่าเสียง่าย และสามารถนำมารับประทานได้ทุกเมื่อ โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์มะม่วงแช่แข็งนิยมนำไปบริโภคสุกปั่นเป็นน้ำผลไม้ หรือประกอบอาหารได้ตลอดทั้งปี นอกจากนี้มะม่วงแช่แข็งสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งได้อีกด้วย (Kittiyopas *et al*., 2012) สำหรับมะม่วงแช่แข็งตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น เป็นการลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ซึ่งในระหว่างการเก็บรักษาอาจสูญเสียความแน่นเนื้อได้เนื่องจากการเกิดผลึกน้ำแข็งในระหว่างการแช่แข็ง ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นนี้จะแทรกตัวในเซลล์ ส่งผลให้สูญเสียความแน่นเนื้อ เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพลักษณะเนื้อสัมผัส

โดยกระบวนการละลายน้ำแข็งของอาหารที่ผ่านการแช่แข็งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การละลายผ่านน้ำ คือ การนำอาหารแช่แข็งมาไหลผ่านน้ำหรือแช่ในภาชนะที่ใส่น้ำสะอาดจนน้ำแข็งละลายจนหมด โดยทั่วไปใช้เวลาในการละลาย 15 นาที ถึง 2 ชั่วโมง การละลายผ่านอากาศ โดยการนำอาหารแช่แข็งวางไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อรอให้ผลึก

น้ำแข็งละลายหมดไป ซึ่งวิธีนี้ใช้เวลาในการละลายน้ำแข็งประมาณ 1-2 ชั่วโมงขึ้นไป นอกจากนี้ยังมีวิธีการละลายน้ำแข็งด้วยการใช้หลอดอินฟราเรดที่มีกำลังไฟฟ้า 250-300 วัตต์ ทำการถ่ายเทความร้อนมายังผิวหน้าของอาหารแช่แข็งโดยตรง จึงใช้เวลาในการละลายน้ำแข็งเพียง 5-20 นาทีเท่านั้น (Anderson & Singh, 2006; Duan & Naterer, 2010; Liu *et al*., 2019; Wu *et al*., 2021; Chen *et al*., 2022)

โดยที่ผ่านมามีการศึกษาการละลายน้ำแข็งในวิธีต่างๆ โดย Peng *et al*. (2022) ได้ศึกษาการละลายน้ำแข็งของมะม่วงสุกแช่แข็งด้วยวิธีการละลายผ่านน้ำ การละลายผ่านอากาศ ใช้เวลาในการละลายน้ำแข็ง 6 นาที และ 28 นาที ตามลำดับ Chen *et al*. (2022) ได้ศึกษาการละลายน้ำแข็งด้วยอินฟาเรด กำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ ร่วมกับไมโครเวฟของพริกหยวก แครอท และแคนตาลูปแช่แข็ง ใช้เวลาในการละลายน้ำแข็ง ไม่เกิน 16 นาที และ Wu *et al*., 2022 ได้ศึกษาวิธีการละลายน้ำแข็งของเนื้อหมูแช่แข็ง โดยวิธีการละลายผ่านน้ำและการละลายผ่านอากาศ ใช้เวลาในการละลายน้ำแข็ง 108 นาที และ 80 นาที ตามลำดับ ซึ่งวิธีการละลายน้ำแข็งจะส่งผลต่อคุณภาพของอาหารแช่แข็ง เช่น ด้านสี เนื้อสัมผัส หรืออัตราการสูญเสียน้ำหนักหลังการละลาย ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของอาหารแต่ละประเภทนั้นๆ ด้วย (Wu *et al*., 2021)

ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษากระบวนการแช่แข็ง และผลของการละลายน้ำแข็งด้วยกระบวนการละลายผ่านน้ำ การละลายผ่านอากาศ และการละลายด้วยอินฟราเรดของมะม่วงแก้วขมิ้นแช่แข็งต่อคุณภาพของมะม่วงแก้วขมิ้นภายหลังการละลายน้ำแข็ง

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่างมะม่วงสุกและการแช่แข็งมะม่วงสุก

ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างมะม่วงสุกพันธุ์แก้วขมิ้น (Kaew Kamin) ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่ได้รับความนิยมทั้งในประเทศและต่างประเทศ นำตัวอย่างมะม่วงสุกพันธุ์แก้วขมิ้นหลังจากบ่มสุกมาเป็นเวลา 4 วัน มีสีเหลืองทอง ผลไม่ช้ำ ไม่มีร่องรอยการโดนทำลายของแมลง และมีน้ำหนักโดยประมาณ 300-350 กรัม (Sriwimon & Boonsupthip, 2011) ปอกเปลือกหั่นเป็นชิ้นลูกเต๋าขนาด 2 x 2 x 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร นำเนื้อมะม่วงที่หั่นเต๋าแล้วมาแช่ในกรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นเวลา 10 นาที ตักตัวอย่างเนื้อมะม่วงสุกขึ้นมาให้สะเด็ดน้ำ จากนั้นบรรจุเนื้อมะม่วง (200 กรัม) ลงถุงพลาสติก LLDPE (Linear low density polyethylene) ขนาด 14 x 22 เซนติเมตร แล้วนำไปแช่แข็งแบบช้าที่อุณหภูมิ -38 องศาเซลเซียส ด้วยตู้แช่แข็งอุณหภูมิต่ำ (Chest freezer) (EVERmed Srl, รุ่น LCDF 390W, ประเทศอิตาลี) บันทึกอุณหภูมิของตัวอย่างจนกระทั่งอุณหภูมิของจุดกึ่งกลางตัวอย่าง เท่ากับ -18 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger temperature) (Yokogawa Electric Corporation, รุ่น FX1008, ประเทศญี่ปุ่น) โดยใช้สายวัดอุณหภูมิเสียบตำแหน่งตรงกลางของตัวอย่างชิ้นเนื้อมะม่วง บันทึกอุณหภูมิจุดกึ่งกลางของตัวอย่างตั้งแต่อุณหภูมิเริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาอัตราการแช่แข็งของมะม่วงแช่แข็ง (Freezing rate) (Charoenrein *et al*., 2013) แสดงดังสมการที่ 1

$$Freezing\ rate\ (^{\circ}C/\min) = \frac{T_1 - T_2}{Freezing\ time\ to\ each\ -18\ ^{\circ}C} \quad (1)$$

โดย	*Freezing rate*	คือ	อัตราการแช่แข็ง (องศาเซลเซียสต่อนาที)
	T_1	คือ	อุณหภูมิตัวอย่างก่อนแช่แข็ง (องศาเซลเซียส)
	T_2	คือ	อุณหภูมิตัวอย่างหลังแช่แข็ง (องศาเซลเซียส)
	Freezing time	คือ	เวลาที่ใช้ในการแช่แข็งจนอุณหภูมิตัวอย่าง -18 องศาเซลเซียส (นาที)

2. การละลายน้ำแข็งของมะม่วงสุกแช่แข็ง

นำตัวอย่างมะม่วงสุกแช่แข็งมาละลายน้ำแข็งด้วยวิธีการละลายทั้ง 3 วิธี ได้แก่ การะลายน้ำแข็งผ่านน้ำ โดยการเปิดน้ำไหลผ่านถุงตัวอย่างจนกระทั่งน้ำแข็งที่เกาะอยู่ละลายหมด การละลายน้ำแข็งผ่านอากาศที่อุณหภูมิห้อง (29 องศาเซลเซียส) ซึ่งเป็นการถ่ายเทอากาศแบบธรรมชาติ และการละลายด้วยอินฟราเรด กำลังไฟฟ้า 250 วัตต์ (Philips Lighting ltd, รุ่น BR125, ประเทศไทย) โดยวางตัวอย่างในถาดทรงตื้นกว้าง 18.5 เซนติเมตร ยาว 28.5 เซนติเมตร และสูง 1.7 เซนติเมตร และความสูงของหลอดอินฟราเรดถึงถาดตัวอย่าง 10 เซนติเมตร ทำการจับเวลาขณะละลายน้ำแข็ง และบันทึกข้อมูล กำหนดจุดยุติของการละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิแกนกลางของเนื้อมะม่วงสุกเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียส และคำนวณหาร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของผลิตภัณฑ์มะม่วงสุกหลังการละลายน้ำแข็ง (%Drip loss) โดยนำตัวอย่างเนื้อมะม่วงสุกมาชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการละลายน้ำแข็งของวิธีการละลายน้ำแข็งทั้ง 3 วิธี ทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ซ้ำ และคำนวณการสูญเสียน้ำหนัก (Assawarachan *et al*., 2014; Wu *et al*., 2021; Peng *et al*., 2022) ดังสมการที่ 2

$$\%\,Drip\ loss = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \qquad (2)$$

เมื่อ	*% Drip loss*	คือ	การสูญเสียน้ำหนักหลังการละลายน้ำแข็ง (ร้อยละ)
	W_1	คือ	น้ำหนักของมะม่วงสุกก่อนการละลายน้ำแข็ง (กรัม)
	W_2	คือ	น้ำหนักของมะม่วงสุกหลังการละลายน้ำแข็ง (กรัม)

3. การตรวจวัดคุณภาพของผลิตภัณฑ์มะม่วงสุกแช่แข็ง

3.1 การวัดค่าสี ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าความหวาน

นำตัวอย่างเนื้อมะม่วงสุกก่อนแช่แข็งและหลังการละลายน้ำแข็งมาปั่นให้ละเอียด จากนั้นทำการวัดค่าสี L^* (ค่าความสว่าง), a^* (ค่าความเป็นสีแดง) และ b^* (ค่าความเป็นสีเหลือง) ด้วยเครื่องวัดสี (Chroma meter) (Konica Minolta, Inc., รุ่น CR-400/410, ประเทศญี่ปุ่น) จากนั้นคำนวณค่าความแตกต่างของสี (ΔE^*) (Peng *et al*., 2022) ดังสมการที่ 3 และวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วยเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) (Metter Toledo, LLC., รุ่น S220-Pharmaceutical, สหรัฐอเมริกา) และวัดค่าความหวานของตัวอย่างด้วยเครื่อง Refractometer (ATAGO CO., LTD., รุ่น 2411-N1, ประเทศญี่ปุ่น) โดยหยดตัวอย่างของเนื้อมะม่วงสุกที่ปั่นละเอียดจนเป็นของเหลวลงที่จุดวัด จากนั้นทำการอ่านค่า โดยการหันเครื่องไปที่จุดที่มีแสงสว่าง ซึ่งการวัดค่าสี ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าความหวาน จะทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ซ้ำ

$$\Delta E^{*} = \sqrt{\left(L_2^{*} - L_1^{*}\right)^2 + \left(a_2^{*} - a_1^{*}\right)^2 + \left(b_2^{*} - b_1^{*}\right)^2} \quad (3)$$

เมื่อ L^*_1 และ L^*_2 คือ ค่าความสว่างของมะม่วงสด และมะม่วงหลังการละลายน้ำแข็ง

a^*_1 และ a^*_2 คือ ค่าความเป็นสีแดงของมะม่วงสด และมะม่วงหลังการละลายน้ำแข็ง

b^*_1 และ b^*_2 คือ ค่าความเป็นสีเหลืองของมะม่วงสด และมะม่วงหลังการละลายน้ำแข็ง

3.2 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส

นำชิ้นตัวอย่างเนื้อมะม่วงสุกก่อนแช่แข็งและหลังการละลายน้ำแข็งมาวัดค่าความแน่นเนื้อ (Firmness) ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer) (Brookfield AMETEK, Inc., รุ่น CT3, ประเทศอังกฤษ) กำหนดขนาดตัวอย่างเป็นชิ้นลูกเต๋าขนาด 2 x 2 x 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร วางชิ้นตัวอย่างของเนื้อมะม่วงสุกแช่แข็งบนแท่นวางตัวอย่าง หัววัดแบบทรงกระบอก (Cylinder probe) ชนิด TA-4 เส้นผ่านศูนย์กลาง 38.1 มิลลิเมตร โดยมีระยะสูงจากผิวหน้าตัวอย่าง 1 เซนติเมตร ความเร็วก่อนการทดลอง 1.00 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วรอบระหว่างทดลอง 1.00 มิลลิเมตรต่อวินาที และความเร็วหลังทดสอบ 1.00 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยทดสอบการตอบสนองของเนื้อสัมผัสของตัวอย่างเนื้อมะม่วงสุกเมื่อมีแรงกด (Compression test) (Sirijariyawat *et al*., 2015) ทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ซ้ำ

3.3 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

ทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของมะม่วงสุกแช่แข็งที่ผ่านการละลายด้วยวิธีต่างๆ โดยใช้ผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 50 คน ด้วยวิธีทดสอบความชอบ 9 ระดับ (9–point hedonic scale) ทางด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ในการทดสอบมีการเตรียมตัวอย่างเนื้อมะม่วงสุกแช่แข็งที่ผ่านการละลายแล้ว โดยการเสิร์ฟตัวอย่างต่อผู้ทดสอบ 3 ครั้ง ครั้งละ 3 ตัวอย่าง โดยพัก 5 นาที ระหว่างการเสิร์ฟแต่ละครั้ง (Wiriyajaree, 2018; Peng *et al*., 2022)

4. การวิเคราะห์ทางสถิติ

ในงานวิจัยนี้เป็นการวางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design , CRD) ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติด้วยวิธี ANOVA (Analysis of Variance) และวิเคราะห์ความแตกต่างของการทดลองด้วยวิธี DMRT (Duncan's new multiple's range test) ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

ผลการวิจัย

1. ผลของการแช่แข็งของผลิตภัณฑ์มะม่วงสุกแช่แข็ง

จากกราฟการแช่แข็งของผลิตภัณฑ์มะม่วงสุกแช่แข็ง แสดงดัง Figure 1 โดยวิธีการแช่แข็งแบบช้า ที่อุณหภูมิ -38 องศาเซลเซียส ด้วยตู้แช่แข็งอุณหภูมิต่ำ เมื่อพิจารณาจากทฤษฎีการแช่แข็ง (Mahae *et al*, 2018; Wu *et al*., 2021) พบว่า ที่ A-S เมื่อนำตัวอย่างมะม่วงสุกไปแช่แข็งซึ่งมีอุณหภูมิเริ่มต้น A ที่ 25 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของตัวอย่างมะม่วงสุกจะลดต่ำลง เนื่องจากมีการคายความร้อนสัมผัส (Sensible heat) ของน้ำอิสระในตัวอย่างมะม่วงสุก จนถึงจุดทำให้เย็นยิ่งยวด หรือ Super cooling (S) อุณหภูมิของน้ำอิสระจะลดต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส แต่ยัง

ไม่เกิดผลึกน้ำแข็ง โดยจะเกิดขึ้นก่อนที่จะเกิดผลึกน้ำแข็งที่ 2 S-B ซึ่งตัวอย่างมะม่วงสุกจะเริ่มเกิดผลึกน้ำแข็งโดยรอบ จะมีการคายความร้อนของการเกิดผลึกหรือความร้อนแฝง (Latent heat) ที่ 3 B-C เป็นการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำอิสระในตัวอย่างมะม่วงสุกเปลี่ยนไปเป็นน้ำแข็งโดยอุณหภูมิจะค่อยๆ คงที่ ที่อุณหภูมิ -5.0 องศาเซลเซียสในระหว่างนี้มีตัวอย่างมะม่วงสุกแช่แข็งจะคายความร้อนแฝงออกมาจนกระทั่งตัวอย่างมะม่วงสุกเป็นน้ำแข็งหมด สุดท้ายเมื่อตัวอย่างมะม่วงสุกกลายเป็นน้ำแข็งจนหมดแล้ว หากยังคงทำการแช่แข็งต่อไปอุณหภูมิน้ำแข็งจะลดลงไปจนกว่าจะเท่ากับอุณหภูมิของตู้แช่แข็ง ในช่วงนี้จะมีการคายความร้อนสัมผัสของน้ำแข็งจนอุณหภูมิจุดกึ่งกลางของตัวอย่างมะม่วงสุกแช่แข็งเท่ากับ -18 องศาเซลเซียส ซึ่งจากการทดลองจะใช้เวลาในการแช่แข็ง เท่ากับ 156±2.64 นาที จากการทดลองพบว่าอัตราการแช่แข็งของมะม่วงสุกพันธุ์แก้วขมิ้น มีค่าเท่ากับ 0.27±0.05 องศาเซลเซียสต่อนาที

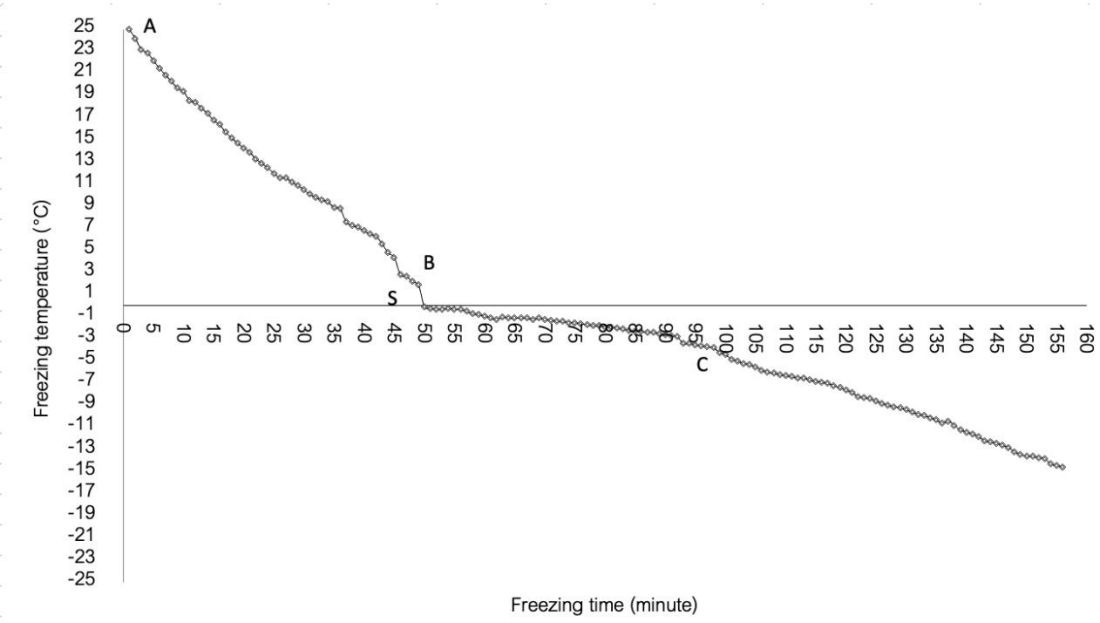

Figure 1 Freezing curve of ripe mango product by slow freezing technique

2. ผลของการละลายน้ำแข็งของผลิตภัณฑ์มะม่วงสุกแช่แข็ง

นำตัวอย่างมะม่วงสุกแช่แข็งมาละลายน้ำแข็งด้วยวิธีการละลายทั้ง 3 วิธี ได้แก่ การละลายน้ำแข็งผ่านน้ำ การละลายน้ำแข็งผ่านอากาศ และการละลายด้วยอินฟราเรด กำลังไฟฟ้า 250 วัตต์ ผลการทดลองแสดงดัง Table 1 พบว่า การละลายผ่านน้ำ (ที่อุณหภูมิ 30.4 องศาเซลเซียส) มีอัตราการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการละลายมากที่สุด ขณะที่การละลายด้วยอินฟราเรด กำลังไฟฟ้า 250 วัตต์ มีอัตราการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการละลายน้อยที่สุด ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับการละลายน้ำแข็งด้วยวิธีการละลายน้ำแข็งผ่านน้ำและการละลายน้ำแข็งผ่านอากาศ เนื่องจากการละลายด้วยอินฟราเรด ใช้เวลาในการละลายเพียง 8 นาที การละลายผ่านน้ำ ใช้เวลา 15

นาที และการละลายผ่านอากาศ ใช้เวลา 25 นาที โดยแนวโน้มของการสูญเสียน้ำหนักจะมากขึ้น หากใช้เวลาในการละลายน้ำแข็งนานเกินไป

Table 1 Rate of weight loss (%Drip loss) of frozen mango undergoing different thawing methods

Thawing method	Drip loss (%)
Water thawing	4.05^{b}±0.43
Air thawing	3.09^{b}±0.14
Infrared thawing	2.34^{a}±0.36

Note : a-b difference letter in same column were significant difference by Ducan's New Multiple Range Test at confident percentage of 95% ($p \leq 0.05$)

3. ผลของคุณภาพของผลิตภัณฑ์มะม่วงสุกแช่แข็ง

นำตัวอย่างมะม่วงสุกก่อนแช่แข็งและหลังการละลายน้ำแข็งมาวัดค่าสี แบบ *L* a* b** ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความหวาน และค่าความแน่นเนื้อ ผลการทดลองตัวอย่างของมะม่วงสุกก่อนแช่แข็ง และผลการทดลองตัวอย่างของมะม่วงสุกหลังการละลายน้ำแข็ง แสดงดัง Table 2

Table 2 Quality of ripe mango product before and after thawing process

Method	*L**	*a**	*b**	ΔE^*	pH	TSS (° Brix)	Firmness (N)
Before freezing	46.39^{a}±0.15	2.81^{a}±0.15	34.73^{a}±0.02	0	5.14^{a}±0.13	12.26^{a}±0.22	6.31^{a}±0.58
Water thawing	44.27^{c}±1.21	2.63^{b}±0.01	33.83^{b}±0.02	2.31^{a}±0.11	4.96^{b}±0.01	11.53^{c}±0.06	1.40^{b}±0.57
Air thawing	44.22^{c}±0.00	2.58^{c}±0.00	31.81^{b}±0.01	2.36^{a}±0.01	4.93^{b}±0.00	11.23^{d}±0.05	1.70^{b}±0.63
Infrared thawing	44.56^{b}±0.00	2.62^{b}±0.01	33.82^{b}±0.00	2.05^{b}±0.01	5.08^{ab}±0.11	11.86^{b}±0.05	2.27^{b}±0.27

Note : a-d difference letter in same column were significant difference by Ducan's New Multiple Range Test at confident percentage of 95% ($p \leq 0.05$)

ผลการทดลองพบว่า ตัวอย่างเนื้อมะม่วงแช่แข็งภายหลังการละลายมีค่า *L**, *a** และ *b** ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างสดก่อนการแช่แข็ง แสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างมีความสว่าง ความเป็นสีแดง และสีเหลืองลดลงภายหลังจากการละลายน้ำแข็ง และ/หรือการแช่แข็ง โดยวิธีการละลายทั้ง 3 วิธี อิทธิผลต่อค่า *L* a* b** และ ΔE^* ของเนื้อมะม่วงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยเนื้อมะม่วงที่ผ่านการละลายด้วยอินฟราเรด มีค่า ΔE^* แตกต่างจากตัวอย่างมะม่วงสดก่อนการแช่แข็งน้อยที่สุด (2.05±0.01) โดยแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับตัวอย่างที่ละลายผ่านน้ำ (2.31±0.11) และตัวอย่างที่ละลายผ่านอากาศ (2.36±0.01) ตามลำดับ

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของตัวอย่างมะม่วงสดก่อนแช่แข็งมีค่า pH เท่ากับ 5.14±0.13 (Table 2) ค่า pH ของการละลายทั้ง 3 วิธี ได้แก่ การละลายน้ำแข็งผ่านน้ำ การละลายน้ำแข็งผ่านอากาศ และการละลายด้วยอินฟราเรด มีค่า pH เท่ากับ 4.96±0.00, 4.93±0.00 และ 5.08±0.00 ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้

เนื้อมะม่วงที่ผ่านการละลายด้วยอินฟราเรดมี pH ลดลงน้อยที่สุดและไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) เมื่อเทียบกับมะม่วงสดก่อนนำไปแช่แข็ง

ตัวอย่างมะม่วงสดก่อนแช่แข็งมีค่าความหวาน เท่ากับ 12.26±0.22 องศาบริกซ์ และค่าความหวานของตัวอย่างมะม่วงสุกหลังการละลายผ่านน้ำ ละลายผ่านอากาศ และละลายด้วยอินฟราเรด เท่ากับ 11.53±0.06, 11.23±0.05 และ 11.86±0.05 องศาบริกซ์ ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$) (Table 2) โดยค่าความหวานของเนื้อมะม่วงแช่แข็งภายหลังการละลายน้ำแข็งด้วยวิธีต่างๆ มีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อมะม่วงสดก่อนการแช่แข็ง โดยตัวอย่างเนื้อมะม่วงที่ผ่านการละลายด้วยอินฟราเรดมีค่าความหวานลดลงน้อยที่สุด รองลงมาคือการละลายผ่านน้ำ และการละลายผ่านอากาศ ตามลำดับ

ค่าความแน่นเนื้อ (Firmness) ของตัวอย่างมะม่วงสดก่อนแช่แข็ง เท่ากับ 6.31±0.58 นิวตัน (Table 2) ส่วนผลการทดลองวัดค่าความแน่นเนื้อของตัวอย่างมะม่วงสุกหลังการละลายน้ำแข็งทั้ง 3 วิธี พบว่า ค่าความแน่นเนื้อของตัวอย่างทั้ง 3 วิธี โดยการละลายผ่านน้ำ มีค่าความแน่นเนื้อ 1.40±0.57 นิวตัน การละลายผ่านอากาศมีค่าความแน่นเนื้อ 1.70±0.63 นิวตัน และการละลายน้ำแข็งด้วยอินฟราเรด เท่ากับ 2.27±0.27 นิวตัน ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$) โดยการละลายด้วยอินฟราเรดสามารถรักษาความแน่นเนื้อได้ดีสุด โดยมีค่าความแน่นเนื้อลดลงจากตัวอย่างมะม่วงสดก่อนแช่แข็ง ร้อยละ 64.02 รองลงมาคือการละลายผ่านอากาศ ความแน่นเนื้อลดลง ร้อยละ 73.06 และการละลายผ่านน้ำ ความแน่นเนื้อลดลง ร้อยละ 77.81

Table 3 Sensory test of ripe mango product after thawing process

Thawing method	Sensory characteristics (scores)					
	Appearance	Color	Odor	Taste	Texture	Overall acceptability
Water thawing	7.88^{a}±0.53	8.61^{a}±0.50	7.67^{ns}±0.58	7.23^{ns}±0.61	6.00^{b}±0.55	7.00^{ab}±0.67
Air thawing	6.56^{c}±0.54	6.97^{b}±0.80	7.33±0.55	7.15±0.81	6.67^{a}±0.93	6.81^{b}±0.42
Infrared thawing	7.90^{a}±0.51	8.34^{a}±0.61	7.56±0.50	7.34±0.49	7.01^{a}±0.57	7.40^{a}±0.51

Note : 1) a-c difference letter in same column were significant difference by Ducan's New Multiple Range Test at confident percentage of 95% ($p\leq0.05$)

2) ns means non-significant difference ($p>0.05$)

4. ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์มะม่วงสุกหลังการละลายน้ำแข็ง

Table 3 แสดงผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์มะม่วงสุกแช่แข็งภายหลังการละลายน้ำแข็งด้วยวิธีต่างๆ ผลการทดลองพบว่า เนื้อมะม่วงทุกตัวอย่างภายหลังการละลายได้รับคะแนนความชอบโดยรวมอยู่ในระดับชอบปานกลาง (6.81-7.40 คะแนน) แสดงให้เห็นว่า ผลิตภัณฑ์ได้รับการยอมรับจากผู้ทดสอบ นอกจากนี้วิธีการละลายน้ำแข็งมีอิทธิพลต่อคุณลักษณะทางด้านประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ โดยตัวอย่างได้รับคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$) ขณะที่มีคะแนนความชอบด้านกลิ่น

และรสชาติแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ซึ่งเนื้อมะม่วงที่ละลายด้วยอินฟราเรดได้รับคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี และเนื้อสัมผัสสูงสุด ส่งผลให้ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมสูงสุด (7.40 คะแนน)

วิจารณ์ผลการวิจัย

จากการศึกษาวิธีการแช่แข็งของมะม่วงสุกพันธุ์แก้วขมิ้นแบบหั่นเต๋า โดยวิธีการแช่แข็งแบบช้าที่อุณหภูมิ -38 องศาเซลเซียส ด้วยตู้แช่แข็งอุณหภูมิต่ำระดับห้องปฏิบัติการ จะใช้เวลาในการแช่แข็ง เท่ากับ 156±2.64 นาที มีอัตราการแช่แข็งของมะม่วงสุกพันธุ์แก้วขมิ้นเท่ากับ 0.27±0.05 องศาเซลเซียสต่อนาที ผลการศึกษากระบวนการละลายน้ำแข็งของมะม่วงสุกแช่แข็ง ได้แก่ การละลายผ่านน้ำ (ที่อุณหภูมิ 30.4 องศาเซลเซียส) การละลายผ่านอากาศหรือพาโดยธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง (ที่อุณหภูมิห้อง 29 องศาเซลเซียส) และการละลายด้วยอินฟราเรด กำลังไฟฟ้า 250 วัตต์ ใช้เวลาในการละลายเท่ากับ 8 15 และ 25 นาที ตามลำดับ และการละลายน้ำแข็งทั้ง 3 วิธี สามารถละลายผลึกน้ำแข็งของตัวอย่างมะม่วงสุกแช่แข็งได้ โดยมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการละลาย (%Drip loss) ของวิธีการละลายด้วยอินฟราเรด การละลายผ่านน้ำ และการละลายผ่านอากาศ ให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 2.34±0.36 3.09±0.14 และ 4.05±0.43 ตามลำดับ จึงพบว่า การละลายด้วยอินฟราเรดมีการสูญเสียน้ำหนักน้อยสุด เหตุที่เป็นเช่นนี้เกิดจากการที่วิธีการละลายด้วยอินฟราเรดใช้เวลาในการละลายน้ำแข็งสั้นที่สุด เนื่องจากกำลังไฟฟ้าจากหลอดอินฟราเรดจะให้ความร้อนโดยตรงแก่ตัวอย่างอาหารแช่แข็งที่เคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าสลับกัน และเกิดการเสียดสีระหว่างโมเลกุลทำให้เกิดความร้อน ซึ่งส่งผลต่อกระบวนการละลายน้ำแข็งได้ดี ถึงแม้อินฟราเรดจะให้ความร้อน แต่ก็ไม่ได้ใช้เวลาในการละลายน้ำแข็งนาน จึงส่งผลกระทบต่อคุณภาพของอาหารน้อยกว่าวิธีการละลายแบบน้ำหรือแบบอากาศ ซึ่งการละลายผ่านน้ำและอากาศ เป็นการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการพาความร้อนแบบธรรมชาติ โดยโมเลกุลของเหลวในผลึกน้ำแข็ง เมื่อได้รับความร้อนจากอุณหภูมิแวดล้อมจะขยายตัวและมีความหนาแน่นน้อยลง เป็นการพาเอาความร้อนเคลื่อนที่ไหลเวียนตามโมเลกุลของของเหลวออกไปด้วย จึงทำให้วิธีการละลายผ่านน้ำและอากาศจะใช้เวลานานกว่าและทำให้ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของอาหารมากกว่าการละลายด้วยอินฟราเรด (Wu *et al.*, 2021) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen *et al.* (2022) ที่ศึกษาการละลายน้ำแข็งของพริกหยวก แครอท และแคนตาลูปแช่แข็ง ที่ทำการละลายน้ำแข็งด้วยอินฟราเรด ที่กำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ ร่วมกับไมโครเวฟ พบว่า มีอัตราการสูญเสียของน้ำหนักลดลงอยู่ระหว่าง ร้อยละ 10 และใช้เวลาในการละลายน้ำแข็งไม่เกิน 16 นาที

นอกจากนี้ วิธีการละลายน้ำแข็งทั้ง 3 วิธี ล้วนส่งผลกระทบต่อคุณภาพของตัวอย่างของเนื้อมะม่วงสุกภายหลังการละลายน้ำแข็ง โดยพบว่า ตัวอย่างเนื้อมะม่วงสุกหลังการละลายน้ำแข็งมีแนวโน้มทางคุณภาพทางกายภาพ (ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความหวาน และค่าความแน่นเนื้อ) ลดลง และเมื่อพิจารณาที่ค่าสีของตัวอย่างหลังการละลาย พบค่า L^* a^* b^* มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p\leq0.05$) โดยวิธีการละลายด้วยอินฟราเรดส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเนื้อมะม่วงสุกพันธุ์แก้วขมิ้นแช่แข็งน้อยที่สุด เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากค่า L^* ที่มีค่าลดลงน้อยที่สุด (44.56±0.00) เมื่อเทียบกับการละลายด้วยวิธีการละลายผ่านน้ำและการละลายผ่านอากาศ หรือพบว่า ค่าสีมีความใกล้เคียงกับตัวอย่างมะม่วงสดก่อนการแช่แข็งมากที่สุด ทั้งนี้สาเหตุที่ทำให้ตัวอย่างมะม่วงหลังการละลายน้ำแข็งเกิดจากปฏิกิริยา Enzymatic browning reaction ที่เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดจากเซลล์เกิดการฉีกขาดและช้ำ โมเลกุลของน้ำบางส่วนเกิดการเคลื่อนที่ออกมาภายนอกเซลล์ จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเอนไซม์กับอุณหภูมิแวดล้อมในการละลาย

น้ำแข็ง ทำให้ออกซิเจนเข้ามาสัมผัสกับสารพอลีฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase, PPO) ที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาและถูกออกซิไดซ์เป็นไดฟีนอล (diphenol) ซึ่งเป็นสารไม่มีสี และถูกออกซิไดซ์ต่อเป็นโอควิโนน (o-quinone) และทำปฏิกิริยาต่อกับกรดอะมิโนหรือโปรตีนทำให้เกิดเป็นสารสีน้ำตาล และจะรวมตัวกันเป็นพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลใหญ่และมีสีน้ำตาลเกิดขึ้นในเนื้อมะม่วง (Sirijariyawat *et al*., 2015) เมื่อทำการละลายน้ำแข็งจึงทำให้ลักษณะทางกายภาพหรือค่าความสว่างของชิ้นมะม่วงลดลง โดยเฉพาะเมื่อทำการละลายด้วยวิธีการละลายผ่านน้ำและการละลายผ่านอากาศซึ่งต้องใช้เวลานานในการทำการละลาย ระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยากับอุณหภูมิแวดล้อมก็จะนานขึ้น รวมถึงส่งผลให้ผลึกน้ำแข็งที่มีอยู่มีโอกาสทำลายเซลล์เนื้อเยื่อได้นานมากยิ่งขึ้น จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะทางกายภาพมากกว่าการละลายด้วยอินฟราเรด (Ioannou & Ggoul, 2013) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Peng *et al*. (2022) ที่ได้ศึกษาการละลายน้ำแข็งของมะม่วงพันธุ์ Tai-Nong แช่เยือกแข็ง พบว่า การละลายน้ำแข็งผ่านอากาศและการละลายผ่านน้ำ ส่งผลให้ค่าสีของมะม่วงหลังการละลายน้ำแข็งมีค่าสีความสว่างลดลง และส่งผลต่อค่า pH เนื่องจากในกระบวนการแช่แข็งและละลายน้ำแข็งมีผลทำให้ปริมาณวิตามินซีซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในมะม่วงลดลง เกิดจากการสูญเสียน้ำหนักระหว่างการละลายน้ำแข็ง วิตามินซีจัดเป็นวิตามินที่ละลายในน้ำได้จะสัมผัสกับออกซิเจน จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ได้ โดยค่า pH ของการละลายทั้ง 3 วิธี ได้แก่ การละลายน้ำแข็งผ่านน้ำ การละลายน้ำแข็งผ่านอากาศ และการละลายด้วยอินฟราเรด มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตามการละลายน้ำแข็งของแต่ละวิธีมีผลต่อค่า pH เพียงเล็กน้อย โดยการละลายด้วยอินฟราเรดมีแนวโน้มค่า pH ลดลงน้อยที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chassagne-Berces *et. al*. (2010) ที่รายงานว่า ค่าความเป็นกรดด่างของมะม่วงน้ำดอกไม้หลังการแช่แข็งมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาจากค่าความหวาน (°Brix) ของตัวอย่างมะม่วงสุกหลังการละลายผ่านน้ำ การละลายผ่านอากาศและการละลายด้วยอินฟราเรด พบว่า มีค่าเท่ากับ 11.53±0.05 องศาบริกซ์, 11.23±0.05 องศาบริกซ์ และ 11.86+0.05 องศาบริกซ์ ตามลำดับ การละลายทั้ง 3 วิธี มีผลต่อค่าความหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยค่าความหวานของการละลายน้ำแข็งมีแนวโน้มความหวานลดลงเมื่อผ่านการละลายน้ำแข็ง ทั้งนี้อาจเกิดจากผลึกน้ำแข็งที่ละลายเป็นของเหลวเจือปนอยู่ในเซลล์ของตัวอย่างมะม่วงจึงส่งผลให้ความหวานลดลงเล็กน้อย ซึ่งการละลายด้วยอินฟราเรดมีค่าความหวานใกล้เคียงตัวอย่างมะม่วงก่อนการแช่แข็งมากที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chassagne-Berces *et al*. (2010) พบว่า การละลายน้ำแข็งด้วยวิธีการละลายในห้องแช่เย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน และที่อุณหภูมิห้องจนอุณหภูมิแกนกลางของตัวอย่างมีค่าเท่ากับอุณหภูมิห้อง ส่งผลต่อความหวานของมะม่วงน้ำดอกไม้ โดยการเสื่อมสภาพของผนังเซลล์เกิดจากการก่อตัวของผลึกน้ำแข็งสามารถกระตุ้นให้เกิดการสกัดของแข็งที่ละลายในน้ำได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหวานลดลงเล็กน้อย ส่วนผลการทดลองด้านความแน่นเนื้อของตัวอย่างเนื้อมะม่วงสุกหลังการละลายน้ำแข็ง พบว่า การละลายน้ำแข็งส่งผลให้มีค่าความแน่นเนื้อแนวโน้มลดลง ซึ่งสาเหตุของความแน่นเนื้อลดลงเกิดจากผลึกน้ำแข็งทำลายโครงสร้างเซลล์มะม่วง ทำให้เซลล์ฉีกขาด เซลล์สูญเสียความสมบูรณ์ และของเหลวบางส่วนจึงไหลออกจากเซลล์ ความแน่นเนื้อของมะม่วงจึงลดลง โดยการละลายด้วยอินฟราเรดสามารถรักษาความแน่นเนื้อได้ดีสุด มีค่าความแน่นเนื้อลดลงจากตัวอย่างมะม่วงก่อนการแช่แข็ง ร้อยละ 64.02 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hu *et al*. (2023) ซึ่งรายงานว่าการละลายน้ำแข็งด้วยวิธีการละลายด้วยอินฟราเรดร่วมกับไมโครเวฟของตัวอย่างเนื้อหมูหลังการละลายน้ำแข็งมีค่าความแน่นเนื้อลดลง แต่สามารถรักษาความแน่นเนื้อของตัวอย่างเนื้อหมูได้ใกล้เคียงกับเนื้อหมูก่อนการแช่แข็งได้ดีกว่าการละลายผ่านอากาศ จากการศึกษาของ Sirijariyawat & Charoenrein (2012) รายงานว่าหลังการแช่แข็งและ

การละลายน้ำแข็งด้วยวิธีการละลายผ่านช่องแช่เย็นของตู้เย็นของมะม่วงมีค่าความแน่นเนื้อลดลง ร้อยละ 66.32 นอกจากนี้จากการศึกษาของ Peng *et al*. (2022) ความแน่นเนื้อของมะม่วงสุกแช่แข็งหลังการละลายน้ำแข็งด้วยวิธีการละลายผ่านอากาศและผ่านน้ำ มีค่าความแน่นเนื้อลดลงแต่การละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟกำลังไฟ 300 วัตต์ และการละลายด้วยความดันสูง สามารถรักษาความแน่นเนื้อได้ดีกว่า และจากการศึกษาของ Chassagne-Berces *et al*. (2010) ความแน่นเนื้อของมะม่วงสุกแช่แข็งหลังการละลายน้ำแข็งด้วยวิธีการละลายในห้องแช่เย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน และที่อุณหภูมิห้องจนอุณหภูมิแกนกลางของตัวอย่างมีค่าเท่ากับอุณหภูมิห้อง มีความแน่นเนื้อลดลง เท่ากับ 0.2 นิวตัน นอกจากนี้การแช่แข็งแบบช้าจะส่งผลให้น้ำภายในเซลล์ออกมาอยู่ภายนอกเซลล์ เนื่องจากอุณหภูมิที่ลดลงต่ำกว่าจุดแช่แข็งใช้เวลานาน ผลึกน้ำแข็งสามารถเข้าไปทำลายเซลล์ของเนื้อเยื่อมะม่วงสุกได้ง่าย เซลล์ของตัวอย่างมะม่วงสุกจะสูญเสียน้ำหนักและหดตัวลง จึงส่งผลต่อคุณภาพของมะม่วงสุกภายหลังการละลายน้ำแข็ง ซึ่งมีค่าแตกต่างจากเนื้อมะม่วงสุกก่อนนำไปแช่แข็งได้เช่นเดียวกัน และผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของเนื้อมะม่วงสุกแช่แข็งภายหลังการละลายน้ำแข็ง ทั้ง 3 วิธี พบว่า ตัวอย่างได้รับคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี เนื้อสัมผัสของมะม่วงสุก และความชอบโดยรวมแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ขณะที่คะแนนความชอบด้านกลิ่น รสชาติ ของการละลายทั้ง 3 วิธีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ส่วนการทดสอบประสาทสัมผัสด้านความชอบโดยรวมมีค่าคะแนนใกล้เคียงกัน พบว่า การละลายด้วยอินฟราเรดมีความชอบปานกลางมากที่สุด เท่ากับ 7.40±0.51 คะแนน เนื่องจากการละลายด้วยอินฟราเรดใช้เวลาในการละลายน้ำแข็งน้อยสุด ส่งผลให้คุณภาพของตัวอย่างเนื้อมะม่วงสุกหลังการละลายน้ำแข็ง เป็นที่ยอมรับของผู้ทดสอบจึงให้คะแนนด้านความชอบโดยรวมสูงสุด รองลงมาการละลายผ่านน้ำมีความชอบโดยรวม 7.00±0.67 คะแนน และการละลายผ่านอากาศมีความชอบโดยรวม 6.80±0.42 คะแนน ซึ่งการละลายผ่านน้ำและการละลายผ่านอากาศใช้เวลาละลายน้ำแข็งนานกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ Peng *et al*. (2022) ที่ได้ทดสอบทางประสาทสัมผัสของมะม่วงหลังการละลายน้ำแข็งด้วยวิธีการละลายผ่านอากาศ การละลายผ่านน้ำ การละลายด้วยไมโครเวฟกำลังไฟ 300 วัตต์ และการละลายด้วยความดันสูง จะมีคะแนนความชอบโดยรวมลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างมะม่วงสด และคะแนนความชอบโดยรวมของตัวอย่างมะม่วงหลังการละลายน้ำแข็งอยู่ในระดับความชอบปานกลางถึงความชอบมาก แต่การละลายด้วยไมโครเวฟกำลังไฟ 300 วัตต์ มีคะแนนความชอบโดยรวมดีกว่าการละลายผ่านอากาศ การละลายผ่านน้ำ และการละลายด้วยความดันสูง

สรุปผลการวิจัย

การถนอมอาหารโดยวิธีการแช่เยือกแข็ง เป็นการลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำลงกว่าจุดเยือกแข็งของอาหารจะช่วยรักษาคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็งและคุณภาพของมะม่วงสุกหลังการละลายน้ำแข็ง โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการแช่แข็ง และผลของการละลายน้ำแข็งด้วยกระบวนการละลายผ่านน้ำ การละลายผ่านอากาศ และการละลายด้วยอินฟราเรดของมะม่วงแก้วขมิ้นแช่แข็งต่อคุณภาพของมะม่วงแก้วขมิ้นภายหลังการละลายน้ำแข็ง ผลการศึกษาพบว่า การแช่แข็งมะม่วงสุกพันธุ์แก้วขมิ้น โดยการแช่แข็งแบบช้าที่อุณหภูมิ -38 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาในการแช่เยือกแข็ง เท่ากับ 156±2.64 นาที มีอัตราการแช่เยือกแข็ง เท่ากับ 0.27±0.05 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยอัตราการแช่แข็งส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์มะม่วงสุกแช่แข็ง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการละลายน้ำแข็งทั้ง 3 วิธี พบว่า การละลายน้ำแข็งด้วยอินฟราเรดกำลังไฟฟ้า 250 วัตต์ มีร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก หลังการละลายน้ำแข็งน้อย

กว่าการละลายผ่านน้ำและการละลายผ่านอากาศ และสามารถรักษาคุณภาพของเนื้อมะม่วงสุกภายหลังการละลายน้ำแข็งได้ใกล้เคียงกับมะม่วงสด ได้แก่ ค่าสี ค่าความหวาน ส่วนค่า pH ของการละลายด้วยอินฟราเรดมีผลต่อค่าความเป็นกรดและด่างลดลงน้อยที่สุด และมีค่าความแน่นเนื้อลดลงจากตัวอย่างเนื้อมะม่วงสดก่อนการแช่เยือกแข็งร้อยละ 64.02 ซึ่งจากการแช่แข็งและการละลายน้ำแข็งของการละลายทั้ง 3 วิธี จะส่งผลให้ค่าความแน่นเนื้อลดลง นอกจากนี้การทดสอบทางประสาทสัมผัสของเนื้อมะม่วงสุกหลังการละลายน้ำแข็งด้วยการละลายด้วยอินฟราเรดได้รับความชอบโดยรวมที่ความชอบปานกลางสูงสุดกว่าการละลายผ่านน้ำและการละลายผ่านอากาศ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีการเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ และเอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับการทำวิจัยให้สำเร็จผ่านไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

Anderson, B.A & Singh, R.P. (2006). Effective heat transfer coefficient measurement during air impingement thawing using an inverse method. *International Journal of Refrigeration*, *29*, 281–293.

Assawarachan, A., Chailungka, N & Suriyakunthorn, P. (2014). Improvement and Effecting Factors of Thawing of Frozen Chicken by Thermoacoustic Method. *Thai Society of Agricultural Engineering Journal, 20,* 16-25. (in Thai)

Chassagne-Berces, S., Fonseca, F., Citeau, M & Marin, M. (2010). Freezing protocol effect on quality properties of fruit tissue according to the fruit, the variety, and the stage of maturity. *LWT - Food Science and Technology*, *43*, 1441-1449.

Charoenrein, S., Khantharam, K., Daorai, P., Veerathummo, K & Charoenreun, V. (2013). Freeze-cracking in papaya cubes: Effect of freezing rate, total soluble solids and cube size. *Food Journal, 43*(2), 67-73.

Chen, B., Zhang., M., Wang, Y., Devahastin, S & Yu, D. (2022). Comparative study of conventional and novel combined modes of microwave- and infrared-assisted thawing on quality of frozen green pepper, carrot and cantaloupe. *LWT-Food Science and Technology*, *154*, 112842, 1-11.

Duan, X & Naterer, G.F. (2010). Heat transfer in a tower foundation with ground surface insulation and periodic freezing and thawing. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 2369–2376.

Hu, R., Zhang, M., Jiang, Q & Law, Q.L. (2023). A novel infrared and microwave alternate thawing method for frozen pork: Effect on thawing rate and products quality. *Meat Science, 198, 109084,* 1-10.

Ioannou, I & Ghoul, M. (2013). Prevention of enzymatic browning in fruit and vegetables. *European Scientific Journal, 9*, 30, 310-341.

Jahurul, M. H. A., Zaidul, I. S. M., Ghafoor, K., Al-Juhaimi, F. Y., Nyam, K.-L., Norulaini, N. A. N. & Mohd Omar, A. K. (2015). Mango (Mangifera indica L.) by-products and their valuable components: A review. *Food Chemistry, 183,* 173-180.

Liu, Y., Chen, S., Pu, Y., Muhammad, A.I., Hang, M., Liu, D & Ye, T. (2022). Ultrasound-assisted thawing of mango pulp: Effect on thawing rate, sensory, and nutritional properties. *Food Chemistry*, *286*, 576-583.

Kittiyopas, D., Kalamphasutra, T & Na Ayudhaya, N.L. (2012). Study on Supply Chain and Logistics Systems of Exporting Mangoes Produced in Central and Northern Regions of Thailand. *Agricultural Science Journal*, *43*(3), 363-367. (in Thai)

Mahae, N., Pichairat, D & Wattanakul, U. (2018). Production Process and Quality Change of Frozen Hard Clam (Meritrix casta). (Research Report). Songkhla: Rajamangala University of Technology Srivijaya (in Thai)

Mühlbauer, W., & Müller, J. (2020). Mango (Mangifera indica L.). *Drying Atlas,* 325–335.

Pairote Wiriyajaree. (2018). *Sensory Evaluation*. Chiang Mai: Chiang Mai University. (in Thai)

Peng, Yu, Zhao, J.H., Wen, X & Ni, Y. (2022). The Comparison of Microwave Thawing and Ultra-High-Pressure Thawing on the Quality Characteristics of Frozen Mango. *Foods, 11*, 1048, 1-12.

Sirijariyawat, A & Charoenrein, S. (2012). Freezing characteristics and texture variation after freezing and thawing of four fruit types. *Songklanakarin Journal of Science and Technology, 34*(5), 517-523.

Sirijariyawat, A., Phakul, W & Arsanok, A. (2015). Effect of freezing on quality of ripe mango flesh. *Khon Kaen Agriculture Journal*, *43*, 846-850. (in Thai)

Wiriyajaree, P. (2018). *Sensory evaluation*. Chiang Mai: Chiang Mai University. (in Thai)

Wu, J., Zhang, M., Bhandari, B & Yang, C.H. (2021). Drip loss control technology of frozen fruit and vegetables during thawing: a review. *Institute of Agrophysics, 35*, 235-250.

Wu, Z., Ma, W., Xue, S.J., Zhou, A., Liu, Q., Hui, A., Shen, Y., Zhang, W & Shi, J. (2022). Ultrasound-assisted immersion thawing of prepared ground pork: Effects on thawing time, product quality, water distribution and microstructure. *LWT - Food Science and Technology, 163*, 113599, 1-9.