



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิศวกรรมอาหาร)

ปริญญา

วิศวกรรมอาหาร

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง

การพัฒนากระบวนการแช่เยือกแข็งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกโดยเครื่องแช่เยือกแข็ง
แบบเป่าปะทะไอพ่น

Development of Jet Impingement Freezing for Ripe Mangoes (cv. Nam Dok Mai)

نامผู้วิจัย

นางสาววันวิสา ศรีวิมล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วราภรณ์ บุญทรัพย์ทิพย์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์สงวนศรี เจริญเหรียญ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนะบุญย์ สัจจอนันตกุล, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่

เดือน

พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนากระบวนการแช่เยือกแข็งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกโดยเครื่องแช่เยือกแข็ง
แบบเป่าปะทะไอพ่น

Development of Jet Impingement Freezing for Ripe Mangoes (cv. Nam Dok Mai)

โดย

นางสาววันวิสา ศรีวิมล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอาหาร)

พ.ศ. 2553

วันวิสา ศรีวิมล 2553: การพัฒนากระบวนการแช่เยือกแข็งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกโดยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบเป่าปะทะไอพ่น ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิศวกรรมอาหาร) สาขาวิศวกรรมอาหาร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์วราภรณ์ บุญทรัพย์ทิพย์, Ph.D. 109 หน้า

มะม่วงน้ำดอกไม้สุกแช่เยือกแข็งเป็นผลไม้ไทยที่เป็นที่รู้จักทั่วโลก ปัญหาคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสที่นุ่มของมะม่วงสุกแช่เยือกแข็งหลังการทำละลาย มีสาเหตุเนื่องมาจากการที่เมแทบอลิซึมของผลึกน้ำแข็งที่ก่อตัวขึ้นในเนื้อมะม่วง วัตถุประสงค์ข้อแรกของงานวิจัยนี้ คือ พัฒนาการเตรียมมะม่วงสุกที่เหมาะสมต่อการแช่เยือกแข็ง โดยศึกษาการใช้มะม่วงที่สุกน้อยในการแช่เยือกแข็งแทนการใช้มะม่วงที่สุกมาก เนื่องจากมะม่วงสุกน้อยมีโครงสร้างเนื้อที่แข็งแรงกว่า จึงน่าจะสามารถทนทานการที่เมแทบอลิซึมของผลึกน้ำแข็งได้ดีกว่า โดยกลั่นรสและสีของมะม่วงสุกน้อยอาจสามารถเพิ่มได้ด้วยการผลัดน้ำมะม่วงสุกและน้ำตาล (สารให้กลิ่นรสธรรมชาติ) เข้าไปในเนื้อมะม่วง ในการศึกษาพบว่าการใช้เคลือบคาร์โบไคบ่มมะม่วง 2 วัน ทำให้ได้มะม่วงมีระดับการสุกน้อยตามที่ต้องการ และมะม่วงนี้ถูกเพิ่มกลิ่นรสธรรมชาติด้วยสารผสมน้ำมะม่วงสุกและน้ำตาลได้เป็นอย่างดีด้วยวิธีการอินฟิวชันที่ความดัน 74.66 kPa 10 นาที มะม่วงนี้ได้คะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัส ความหวาน และสี 7 – 8 คะแนน (traditional 9- point hedonic scale) หลังจากการแช่เยือกแข็งด้วยลมเป่า (air-blast), ลมเป่าปะทะไอพ่น (jet impingement, JI), ไนโตรเจนเหลว (cryogenic) และการทำละลาย คะแนนความชอบของมะม่วงสุกน้อยยังคงสูงอยู่ (7 – 8) และคะแนนการสูญเสียน้ำหนักหลังการละลาย (drip loss) นั้นมีค่าต่ำ (9 – 12 g/100g) ซึ่งมะม่วงสุกน้อยนี้มีความทนทานต่อการแช่เยือกแข็งมากกว่ามะม่วงสุกมาก ซึ่งแสดงได้ว่าวิธีการนี้ช่วยลดการสูญเสียของมะม่วงได้ เพราะในการแช่เยือกแข็งถ้าต้องรอให้มะม่วงสุกมากก่อน มะม่วงสุกมากมักจะเสี่ยงต่อการเน่าเสียได้เร็ว การใช้มะม่วงสุกน้อยได้นั้นก็จะลดความเสี่ยงนี้ลง และวิธีการที่เสนอนี้ได้แก้ไขข้อด้อยของมะม่วงสุกน้อยในด้านกลิ่นรสและรสชาติได้ด้วย จากนั้นวัตถุประสงค์ข้อสองของงานวิจัยนี้ คือ ประเมินความเป็นไปได้ในการใช้การแช่เยือกแข็งมะม่วงสุกน้อย (บ่ม 2 วัน ด้วยเคลือบคาร์โบไคบ) และสุกมาก (บ่ม 3 วัน) ด้วยลมเป่าปะทะไอพ่นด้วยสภาวะต่างๆ วิธีการแช่เยือกแข็งนี้เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีการใช้ลมเย็นที่ความเร็วสูงเป่าผ่านปะทะผิวหน้าอาหารโดยตรง ซึ่งจะลดความเป็นฉนวนที่ห่อหุ้มรอบผิวอาหารได้ดีกว่าวิธีการที่ไม่มีการควบคุมทิศทางลม เช่นการแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า (air-blast) ในการศึกษาทำการแปรค่าความเร็วลม (v) 15, 25 และ 35 m/s โดยวางหัวเป่าลมที่ตำแหน่งเหนือมะม่วง และแปรค่าความเร็วลม 10, 15 และ 20 m/s สำหรับการวางหัวเป่าลมที่เหนือและใต้มะม่วง ที่ -40°C และอัตราส่วนระหว่างระยะทางระหว่างปลายหัวเป่าลมถึงผิวมะม่วง (H) และเส้นผ่านศูนย์กลางหัวเป่าลม (D) คือ $H/D = 5, 6$ และ 7 โดยมะม่วงหั่นเป็นชิ้นลูกเต๋า พบว่าสภาวะการแช่เยือกแข็งที่เหมาะสม ($H/D = 6, v = 35 \text{ m/s}$) สามารถทำให้มะม่วงสุกน้อยและมากหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลายมีคุณภาพดีมากโดยมีคุณภาพเทียบได้กับมะม่วงสุกแช่เยือกแข็งด้วยไนโตรเจนเหลว

Wanwisa Sriwimon 2010: Development of Jet Impingement Freezing for Ripe Mangoes (cv. Nam Dok Mai). Master of Science (Food Engineering), Major Field: Food Engineering, Department of Food Science and Technology. Thesis Advisor: Assistant Professor Waraporn Boonsupthip, Ph.D. 109 pages.

Frozen ripe mango (cv. Nam Dok Mai) is a Thai fruit which is globally popular. It is texturally damaged due to formation of ice crystals during freezing preservation. The first objective of this investigation was to optimize ripe mango preparation for freezing process. Partially ripe mango was used as an alternative of ripe mango. Based on its stronger structure, partially ripe mango could better withstand texture damage by ice crystals. Its flavor and color could be enhanced by impregnation of mango juice and sugars (natural flavor) into the mango matrix. This investigation found that calcium carbide incubation for two days helped prepare the mango at a partially ripe state. Vacuum infusion was more effective than natural mass diffusion in incorporation of mango juice-sugar mixture (shorter soaking time (~10 min at 74.66 kPa) and better mango quality (texture, solid content and color sensory scores ~ 7 – 8 in a traditional 9- point hedonic scale). After freezing (air-blast, jet-impingement (JI) and cryogenic freezing) and thawing, the juice/sugar-infused mangoes were high in sensory scores (7 – 8) and low in drip loss (9 – 12 g/100g) values. They better tolerated freezing damage than did ripe mango. This proposed method can help reduce the post-harvest losses arising from the faster spoilage of more ripe mangoes. It enhances natural flavor and taste of the partially forced ripening mangoes which normally impart only color. The second objective of this investigation was to evaluate the potential use of JIF with cool air for frozen partially ripe and ripe mango (incubated with calcium carbide for 2 and 3 days) as an alternative. JIF is a novel freezing technology which applies cool air at high velocity. The air is controlled to perpendicularly strike onto food surface to better reduce the inherent air insulation around the food surface than directionally uncontrolled air like air-blast freezing. In the JIF experimental process, the air velocity ($v = 15, 25$ and 35 m/s for one upper jet nozzle and $v = 10, 15$ and 20 m/s for upper and lower jet nozzles) and the ratio of distance between nozzle and mango surface, and nozzle diameter ($H/D = 5, 6$ and 7) were varied. It was found that partially ripe and ripe mangoes after frozen at proper jet impingement conditions ($H/D = 6, v = 35$ m/s) had as best quality as those frozen with liquid nitrogen.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. วราภรณ์ บุญทรัพย์ทิพย์ อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก เป็นอย่างสูง ที่คอยช่วยเหลือ และให้คำแนะนำที่ดีมาตลอดในการวิจัย ตลอดจน
ตรวจสอบ และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จเรียบร้อย ขอกราบขอบ
พระคุณ รศ.ดร. สงวนศรี เจริญเหรียญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา
แนะนำ และช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ดร. วีระชัย จิตตานิษฐ์ ประธานการสอบ และ ผศ.ดร. พรทิพย์
ศิริสุนทรลักษณ์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ให้ความกรุณาตรวจแก้วิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำ
จนวิทยานิพนธ์สำเร็จเรียบร้อย

ขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาที่
ศึกษา ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์แห่งนี้

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์
อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิทยาศาสตร์และ
เทคโนโลยีการอาหารทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในสาขาวิศวกรรมอาหารทุกคนที่คอยให้กำลังใจ คำแนะ
นำในยามที่ท้อ หรือมีอุปสรรค และให้ความช่วยเหลือทั้งร่างกาย แรงใจ อย่างเต็มที่ อีกทั้งยังมอบ
มิตรภาพที่ดี จนข้าพเจ้ามีกำลังใจ ฝ่าฟันอุปสรรคต่างๆ จนสำเร็จเรียบร้อย

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้
อบรมเลี้ยงดู ให้กำลังใจ และคำปรึกษาที่ดี น้องสาวที่คอยเป็นห่วงและให้กำลังใจกันเสมอมา และ
ครูอาจารย์ทุกท่านของข้าพเจ้า

วันวิสา ศิริวิมล

ตุลาคม 2553

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	27
อุปกรณ์	27
วิธีการ	28
ผลและวิจารณ์	36
สรุปและข้อเสนอแนะ	72
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	73
ภาคผนวก	82
ภาคผนวก ก การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส	83
ภาคผนวก ข การคำนวณหาจุดเยือกแข็งเริ่มต้น (T_{Fi}) และอุณหภูมิที่เกิดปริมาณน้ำแข็งในมะม่วง 80% ($T_{80\%ice}$)	85
ภาคผนวก ค การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส	91
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	109

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณค่าทางโภชนาการของมะม่วง: 100 กรัม	7
2	ตัวอย่างของการนับอายุของมะม่วงเพื่อการเก็บเกี่ยว (บางพันธุ์)	9
3	ความถ่วงจำเพาะ การจมน้ำ และช่องว่างระหว่างเมล็ดกับเปลือกหุ้มเมล็ด ชั้นนอกของมะม่วงบางพันธุ์	10
4	แสดงอุณหภูมิจุดเยือกแข็งแรก (T_{if}) และอุณหภูมิที่เกิดปริมาณน้ำแข็งใน มะม่วง 80% ($T_{80\% ice}$) ที่ปริมาณน้ำตาลแตกต่างกัน	34
5	ผลของการประเมินทางด้านประสาทสัมผัสของมะม่วงที่ผ่านเทคนิคการอิน ฟิวชันภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ความดัน 74.66 kPa เวลา 10 นาทีที่ความ เข้มข้นของน้ำมะม่วงต่างๆ	45
6	ผลของการประเมินทางด้านประสาทสัมผัสของมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง และการทำละลาย	47
7	แสดงผลของปัจจัยการแช่เยือกแข็งต่อคุณลักษณะต่างๆ เพื่อพิจารณาหา สภาวะที่ให้คุณลักษณะมะม่วงแช่เยือกแข็งที่ดีที่สุดสำหรับห้วเปาลมห้วยบน	63
8	แสดงผลของปัจจัยการแช่เยือกแข็งต่อคุณลักษณะต่างๆ เพื่อพิจารณาหา สภาวะที่ให้คุณลักษณะมะม่วงแช่เยือกแข็งที่ดีที่สุดสำหรับห้วเปาลมห้วยบน + ล่าง	64
ตารางผนวกที่		
ข1	แสดงอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณหา T_{Fi} และ $T_{80\% ice}$	90
ค1	แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของมะม่วงบ่ม 0-4 วัน	92
ค2	ผลของเวลาที่ใช้ในเทคนิคการอินฟิวชันและเทคนิคการแพร่แบบธรรมชาติ	93
ค3	ผลของความดันสุญญากาศที่ใช้ในเทคนิคการอินฟิวชันภายใต้สภาวะ สุญญากาศ ที่เวลา 10 นาที	95

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก4 ผลของอัตราส่วนของน้ำมะม่วงที่ใช้ในเทคนิคการอินฟิวชันภายใต้สภาวะ สุญญากาศที่ความดัน 74.66 kPa เวลา 10 นาที	96
ก5 ลักษณะของมะม่วงอินฟิวชันที่ผ่านการแช่เยือกแข็งเครื่องแช่เยือกแข็งแบบ ต่าง ๆ และการทำละลาย	97
ก6 ลักษณะของมะม่วงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบ ต่าง ๆ และการทำละลาย	98
ก7 ลักษณะของมะม่วงอินฟิวชันที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็ง แบบเป่าปะทะไอฟัน โดยใช้หัวเป่าลมหัวบนและการทำละลาย	99
ก8 ลักษณะของมะม่วงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบเป่า ปะทะไอฟัน โดยใช้หัวเป่าลมหัวบนและการทำละลาย	101
ก9 ลักษณะของมะม่วงอินฟิวชันที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็ง แบบเป่าปะทะไอฟัน โดยใช้หัวเป่าลมหัวบน + หัวล่างและการทำละลาย	103
ก10 ลักษณะของมะม่วงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบเป่า ปะทะไอฟัน โดยใช้หัวเป่าลมหัวบน + หัวล่างและการทำละลาย	105
ก11 ลักษณะของมะม่วงอินฟิวชันที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็ง แบบเป่าปะทะไอฟันด้วยสภาวะที่ให้ผลดีสำหรับการใช้หัวเป่าลมหัวบน และ หัวบน + หัวล่างและการทำละลาย	107
ก12 ลักษณะของมะม่วงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบเป่า ปะทะไอฟันด้วยสภาวะที่ให้ผลดีสำหรับการใช้หัวเป่าลมหัวบน และหัวบน + หัวล่างและการทำละลาย	108

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า	
1	การแช่เยือกแข็ง : (a) การเกิดผลึกน้ำแข็งที่อุณหภูมิเยือกแข็งต่าง ๆ (b) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอาหารผ่านช่วงวิกฤต	14
2	ลักษณะการไหลของลำอากาศในเครื่องแช่เยือกแข็งแบบเป่าปะทะ	18
3	ลักษณะการไหลของลำอากาศที่พุ่งตั้งฉากผิวหน้าอาหารในเครื่องแช่เยือกแข็งแบบเป่าปะทะ	20
4	ผลกระทบของการแช่เยือกแข็งต่อเนื้อเยื่อพืช: (1-4) การแช่เยือกแข็งแบบช้า (5-6) การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว	21
5	ปฏิกิริยาที่กรดแอสคอบิกช่วยยับยั้งการเกิดสีน้ำตาล	24
6	แสดงลักษณะของเครื่องอินฟราเรด	30
7	แสดงลักษณะของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบ Jet impingement ช้าย: หัวเป่าลมหัวบน, ขวา: หัวเป่าลมหัวบน + หัวล่าง	31
8	แสดงลักษณะของเครื่องแช่เยือกแข็ง ช้าย: Cryogenic, ขวา: Air-blast	32
9	แสดงการวัดอุณหภูมิที่บริเวณต่างๆ	35
10	ลักษณะของมะม่วงที่ผ่านการบ่มด้วยแคลเซียมคาร์ไบด์ เป็นเวลา 4 วัน	37
11	การเปลี่ยนแปลงของลักษณะเนื้อมะม่วงระหว่างระยะเวลาการบ่ม (a) สี (L^* , a^* และ b^*) และ (b) TSS, คะแนนความชอบ (รสหวาน และ กลิ่นรสมะม่วง), พีเอช และความแน่นเนื้อ (แรงกด)	38
12	ผลของวิธีการเติมสารเข้าไปในเนื้อมะม่วง, NMD (ความดันบรรยากาศ) และ VI (21.33 kPa) สำหรับมะม่วงสุกน้อยที่แช่ในสารละลายน้ำตาลที่ช่วงเวลาต่างๆ โดยแสดงลักษณะ ต่าง ๆ ประกอบด้วย (a) color และ (b) TSS และ Force	42
13	ผลของความดันสุญญากาศต่อลักษณะของมะม่วงสุกน้อยที่ถูกแช่ในสารละลายน้ำตาลเป็นเวลา 10 นาที โดยลักษณะต่างๆ ประกอบด้วย TSS, สี และความแน่นเนื้อ	43
14	ผลของความเข้มข้นของน้ำมะม่วงต่อลักษณะของมะม่วงสุกน้อยหลังการอินฟราเรด, การแช่เยือกแข็งและการทำละลาย (a) ค่าสี (L^* , a^* and b^*), TSS และเนื้อสัมผัส (force)	45

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
15	แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงลักษณะของมะม่วงสุกน้อย (PR, 2 วัน) และมะม่วงสุก (FR, 3 วัน) ในระหว่างกระบวนการ: มะม่วงสด, การแช่มะม่วง PR และ FR ในสารละลายกรดซิตริกและแคลเซียมคลอไรด์ จากนั้นมะม่วงสุกน้อยผ่านการอินฟิวด้วยสารละลายผสมระหว่างน้ำมะม่วง 5 องศาบริกซ์และน้ำตาล ที่ 74.66 kPa เป็นเวลา 10 นาที (มะม่วงสุกไม่ผ่านการอินฟิวชัน) ต่อมามะม่วงจะถูกนำมาแช่เยือกแข็งและทำการละลาย โดยการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่อง Air-blast, Jet impingement และ Cryogenic และ (a) การเปลี่ยนแปลงค่าสี (color) (b) การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TSS ($^{\circ}$ Brix) (c) % การสูญเสียน้ำหนักหลังการทำละลาย (% Drip loss) และ (d) ความแน่นเนื้อ (Force, g)	50
16	ลักษณะของมะม่วงสุกน้อยที่ผ่านการอินฟิวชัน (PR+VI) และมะม่วงสุก (R) ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีการต่างๆ	51
17	แสดงอัตราการแช่เยือกแข็งของมะม่วงอินฟิวชัน โดย a) หัวเป่าลมหัวบน และ b) หัวเป่าลมหัวบน + ล่าง	53
18	แสดงอัตราการแช่เยือกแข็งของมะม่วงสุก โดย a) หัวเป่าลมหัวบน และ b) หัวเป่าลมหัวบน + ล่าง	54
19	แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบอัตราการแช่เยือกแข็งระหว่างมะม่วงอินฟิวชันและมะม่วงสุก ที่ $H/D = 5$, หัวเป่าลมหัวบน	55
20	แสดง % การสูญเสียความแน่นเนื้อของมะม่วง โดย a) หัวเป่าลมหัวบน และ b) หัวเป่าลมหัวบน + ล่าง	57
21	แสดง % การสูญเสียน้ำหนักหลังการทำละลายของมะม่วง โดย a) หัวเป่าลมหัวบน และ b) หัวเป่าลมหัวบน + ล่าง	59
22	แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของมะม่วงก่อนและหลังการแช่เยือกแข็งและการทำละลาย	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่

หน้า

- 23 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงลักษณะของมะม่วงอินฟิวชัน โดยการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่อง Jet-impingement ($VI = \text{Jet1: } 6,35, \text{Jet2: } 7,20$) , ($R = \text{Jet1: } 5,35, \text{Jet2: } 5,15$) และ Cryogenic โดย (a) % การสูญเสียน้ำหนักหลังการทำละลาย [% Drip loss] (b) % การสูญเสียความแน่นเนื้อ [%Force loss] (c) อัตราการแช่แข็ง [Freezing rate] 66
- 24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง% การสูญเสียน้ำหนักหลังการละลาย และอัตราการแช่เยือกแข็งของมะม่วงอินฟิวชัน โดย ซ้าย คือ อัตราการแช่เยือกแข็งนิยามที่ 1 ขวา คือ อัตราการแช่เยือกแข็งนิยามที่ 2 และ (a) อัตราการแช่เยือกแข็งที่ใจกลางอาหาร (b) อัตราการแช่เยือกแข็งที่ผิวอาหาร (c) ความแตกต่างระหว่างอัตราการแช่เยือกแข็งระหว่างใจกลางอาหารและผิวอาหาร 70
- 25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง% การสูญเสียน้ำหนักหลังการละลาย และอัตราการแช่เยือกแข็งของมะม่วงสุก โดย ซ้าย คือ อัตราการแช่เยือกแข็งนิยามที่ 1 ขวา คือ อัตราการแช่เยือกแข็งนิยามที่ 2 และ (a) อัตราการแช่เยือกแข็งที่ใจกลางอาหาร (b) อัตราการแช่เยือกแข็งที่ผิวอาหาร (c) ความแตกต่างระหว่างอัตราการแช่เยือกแข็งระหว่างใจกลางอาหารและผิวอาหาร 71

การพัฒนากระบวนการแช่เยือกแข็งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกโดยเครื่องแช่เยือกแข็ง แบบเป่าปะทะไอพ่น

Development of Jet Impingement Freezing for Ripe Mangoes (cv. Nam Dok Mai)

คำนำ

มะม่วงเป็นไม้ผลเศรษฐกิจที่มีการปลูกกันมากในประเทศไทย ทั้งนี้เพราะเป็นพืชที่ปลูกและดูแลรักษาง่าย และปลูกได้ทั่วประเทศ รวมทั้งเป็นไม้ผลที่เป็นที่รู้จักและนิยมบริโภคทั้งในและต่างประเทศ สร้างรายได้ให้ประเทศอย่างมาก ซึ่งมูลค่าการส่งออกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี ในปี 2551 มีปริมาณการส่งออกมะม่วงสด 15,476 ตัน คิดเป็นมูลค่า 354.18 ล้านบาท (กรมศุลกากร) โดยพันธุ์ที่ส่งออกส่วนใหญ่ได้แก่พันธุ์น้ำดอกไม้ ทั้งน้ำดอกไม้สีทองและน้ำดอกไม้เบอร์ลี ตลาดส่งออกที่สำคัญได้แก่ ประเทศญี่ปุ่น ไต้หวัน และประเทศในกลุ่มสหภาพยุโรป ประเทศไทยส่งออกมะม่วงมานานนับสิบปี เริ่มแรกส่งพันธุ์หนังกกลางวันไปประเทศญี่ปุ่นในปี 2542 ปัจจุบันเปลี่ยนเป็นพันธุ์น้ำดอกไม้ ทั้งน้ำดอกไม้สีทองซึ่งในประเทศญี่ปุ่นรู้จักในชื่อ “โกลเด้นแมงโก” (Golden Mango) และน้ำดอกไม้เบอร์ลี (Normal Mango) (กรมวิชาการเกษตร, 2548) และเมื่อไม่นานมานี้สหรัฐอเมริกาเตรียมอนุญาตนำเข้าผลไม้จากไทย 6 ชนิด ซึ่งหนึ่งในนั้นคือ มะม่วง จากการประเมินในเบื้องต้น พบว่า มะม่วงจะเป็นผลไม้ที่ศักยภาพสูงในตลาดสหรัฐอเมริกา เพราะการนำเข้ามะม่วงของสหรัฐอเมริกาแต่ละปีมีเป็นสัดส่วน 35% ของการส่งออกมะม่วงของโลก คู่แข่งสำคัญ ได้แก่ เม็กซิโก เติร์กเมนิกัน และบราซิล (มกอช., 2550) การส่งออกมะม่วงนั้นมีหลายรูปแบบทั้งผลสด และการแปรรูปในลักษณะต่างๆ ในการส่งผลสดนั้นมักจะมีปัญหาในเรื่องการกีดกันทางการค้าค่อนข้างสูง อย่างการควบคุมสารเคมีเป็นต้น ประกอบกับมะม่วงไทยเป็นสินค้าที่มีโอกาสสูญเสียและเสียหายสูง และผลสดยังมีอายุการเก็บรักษาค่อนข้างสั้น (สุขสานต์, 2550) ซึ่งวิธีการแปรรูปที่จะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของมะม่วงได้นานขึ้น และช่วยรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น ด้านสี กลิ่น รส และคุณค่าทางโภชนาการได้ดี คือ วิธีการแช่เยือกแข็ง

ถึงแม้วิธีการแช่เยือกแข็งจะเป็นวิธีการถนอมอาหารที่จะช่วยรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ดี แต่วิธีการเตรียมก่อนกระบวนการแช่เยือกแข็งถือเป็นสิ่งสำคัญ และเนื่องจากผลไม้มีน้ำเป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณที่มาก เมื่อเข้าสู่กระบวนการแช่เยือกแข็งจะเกิดผลึกน้ำแข็งเป็นจำนวน

มาก ส่งผลให้เนื้อเยื่อถูกทำลายมากขึ้นทำให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีคุณภาพไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้น การลดปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์ก่อนกระบวนการแช่เยือกแข็งจึงเป็นอีกวิธีที่นิยมปฏิบัติ และเทคนิคที่น่าสนใจ คือ เทคนิคการอินฟิวชันภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Vacuum infusion) เป็นการเตรียมสำหรับผัก ผลไม้ก่อนจะเข้าสู่กระบวนการต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการทำแห้งหรือการแช่เยือกแข็ง ซึ่งจะช่วยในการปรับปรุงคุณภาพ โดยสารต่างๆ ที่อยู่ในสารละลายจะสามารถเข้าไปในโครงสร้างเนื้อผัก ผลไม้ได้อย่างรวดเร็วภายใต้สภาวะสุญญากาศ มะม่วงที่มีระดับความสุกเหมาะสมและผ่านกระบวนการเตรียมที่เหมาะสมก่อนการแช่เยือกแข็งเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการผลิตมะม่วงแช่เยือกแข็ง การทำให้เนื้อมะม่วงสุกมีความแข็งแรงทนทานต่อการแช่เยือกแข็งได้ดีขึ้น น่าจะทำให้เนื้อสัมผัสมะม่วงมีคุณภาพดีหลังการแช่เยือกแข็ง

ปัจจุบันได้มีการศึกษาหาเพื่อหาเทคนิควิธีการแช่เยือกแข็งใหม่ๆ ที่จะสามารถช่วยเพิ่มคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็งให้ดียิ่งขึ้น โดยเฉพาะคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส ซึ่งอาหารแช่เยือกแข็งที่ผลิตในปัจจุบันจะใช้เทคโนโลยี เช่น การแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า (Air-blast freezer) และแบบแผ่นสัมผัส (Contact plate freezer) ซึ่งทำให้มีคุณภาพด้านประสาทสัมผัสของอาหารแช่เยือกแข็งไม่ค่อยดีนัก อาหารแช่เยือกแข็งหลังการละลายมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ถูกทำลายจากผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่และมีการสูญเสียสารอาหารจากการสูญเสียน้ำหลังการละลาย (Drip loss) ส่วนการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีไครโอเจนิค (Cryogenic freezing) เป็นวิธีที่ให้คุณภาพอาหารแช่เยือกแข็งด้านเนื้อสัมผัสดีเป็นอย่างมาก แต่เป็นวิธีการที่มีราคาสูงมาก ซึ่งไม่เหมาะสมกับอาหารที่ไม่มีมูลค่ามากพอ

เทคนิคการแช่เยือกแข็งแบบเป่าปะทะไอพ่นเป็นเทคโนโลยีทางเลือกใหม่ที่น่าสนใจ โดยเป็นการใช้ลมเย็นความเร็วสูงพุ่งเข้าปะทะในแนวดิ่งตั้งฉากกับผิวด้านหน้า และ/หรือผิวด้านหลังของอาหารโดยตรงเพื่อทำลายชั้นของฉนวนอากาศที่ผิวผลิตภัณฑ์และสร้างกระแสลมที่ปั่นป่วน (Turbulent flow) ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลอากาศสูงขึ้น ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงถึง $400 \text{ W/m}^2\text{°C}$ (Anderson and Singh, 2006) อัตราการแช่เยือกแข็งอาหารจะถูกเร่งให้สูงขึ้นได้อย่างมากทำให้ผลึกน้ำแข็งในอาหารแช่เยือกแข็งมีขนาดเล็กลงมาก ส่งผลให้อาหารแช่เยือกแข็งมีคุณภาพดีขึ้น มีค่าการสูญเสียน้ำหลังการละลายลดลง และมีสีส้มสวยงามมากขึ้น นอกจากนี้ เทคนิคนี้ยังมีราคาไม่สูง จึงน่าที่ทำการศึกษาเพื่อให้เข้าใจในหลักการมากยิ่งขึ้น จากที่กล่าวมาข้างต้น การผลิตมะม่วงแช่เยือกแข็งพร้อมรับประทาน (Ready to eat) จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ และในการศึกษารุ่นนี้ จะมุ่งเพื่อศึกษาการพัฒนากระบวนการแช่เยือกแข็งแบบเป่าปะทะไอพ่นกับชิ้นมะม่วงแช่เยือกแข็ง เนื่องจากมะม่วงมีการส่งออกที่เพิ่มมากขึ้น และเพื่อเป็นการ

พัฒนาคุณภาพมะม่วงส่งออก ซึ่งกระบวนการแช่เยือกแข็งแบบเป่าปะทะไอน้ำที่ถูกพัฒนาขึ้นมา
น่าจะเป็นการช่วยให้กระบวนการแช่เยือกแข็งมีประสิทธิภาพสูงโดยทำให้คุณภาพของอาหารแช่
เยือกแข็งดีขึ้นและต้นทุนการผลิตอยู่ในระดับที่น่าพอใจ และเป็นทางเลือกใหม่ให้กับ
ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมผลไม้แช่เยือกแข็งส่งออก



วัตถุประสงค์

1. พัฒนาระบวนการเตรียมมะม่วงสุกที่เหมาะสมต่อการแช่เยือกแข็ง
2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการแช่เยือกแข็งมะม่วงสุกด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าปะทะไอพ่น



การตรวจเอกสาร

1. มะม่วง

ชื่ออื่นๆ : มะม่วงบ้าน มะม่วงสวน หมักโหม่ง หมากม่วง ลูกม่วง

ชื่อสามัญ : Mango, Mango tree

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Manifera indica* Linn.

วงศ์ : Anacardiaceae

มะม่วงมีถิ่นกำเนิดแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และอินเดียแล้วเผยแพร่ไปยังประเทศในแถบร้อนและอบอุ่นของโลก เป็นผลไม้เศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น ฟิลิปปินส์ ไทย และยังมีการปลูกกันมากทางใต้ของทวีปเอเชีย โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศอินเดียซึ่งได้ชื่อว่าเป็นประเทศที่มีการปลูกมะม่วงมากเป็นอันดับหนึ่งของโลก (ดวงตรา, 2526)

มะม่วงเป็นไม้พุ่มยืนต้น สูงประมาณ 10 - 15 เมตร ลำต้นตรง เรือนยอดกลม ทึบ ใบเดี่ยว การเกาะติดของใบบนกิ่งแบบเวียน ใบรูปหอกยาว ปลายเรียวแหลม โคนมนแหลม ออกดอกประมาณช่วงเดือนธันวาคม ถึง มกราคม ดอกออกเป็นช่อที่ปลายกิ่ง ในช่อดอกหนึ่งๆ จะมีช่อย่อยหลายช่อ ดอกย่อยขนาดเล็กสีเหลืองอ่อน ก้านดอกสั้นกลีบดอกมี 5 กลีบ ผลดิบมีสีเขียว เมื่อสุกเปลี่ยนเป็นสีเหลืองหรือเหลืองส้ม มีเมล็ดภายใน 1 เมล็ด ผลสุกประมาณเดือนพฤษภาคม ถึง มิถุนายน และมีพันธุ์ทวายซึ่งออกนอกฤดูการผลิตเป็นแบบผลสด รูปทรง ขนาด และสีผิวแล้วแต่ชนิดพันธุ์นั้นๆ บริโภคได้ทั้งผลดิบและผลสุก รสเปรี้ยว มัน และหวาน (วิจิตร, 2529) โดยองค์ประกอบที่มีอยู่ในมะม่วงแสดงดังตารางที่ 1

มะม่วงในประเทศไทยมีมากหลายพันธุ์ สามารถแบ่งตามลักษณะการนำมาบริโภคได้ 3 กลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้

1) มะม่วงสำหรับรับประทานผลดิบหรือมะม่วงมัน มะม่วงประเภทนี้มี 2 กลุ่ม กลุ่มแรกจะมีรสหวานเมื่อตอนแก่จัดแต่ยังไม่สุก เช่น เขียวเสวย แรด ทองคำ พิมเสนมัน อีกกลุ่มหนึ่งมีรสมันไม่เปรี้ยวตั้งแต่ผลยังเล็ก เช่น สายฝน ฟ้ายัน หนองแซง โดยทั่วไปมะม่วงรับประทานดิบทุกชนิด

จะเก็บไว้ในลักษณะมะม่วงรับประทานดิบได้ไม่กี่วันจะเริ่มสุก ซึ่งโดยมากரசจะไมหวาน อร่อย จึงไม่นิยมรับประทานสุก ยกเว้นบางพันธุ์ใช้รับประทานสุกได้ดี เช่น ทองคำ แรด เขียวเสวย

2) มะม่วงสำหรับรับประทานผลสุก มะม่วงประเภทนี้เมื่อดิบมีรสเปรี้ยวมาก เมื่อสุกจะมีรสหวาน ดังนั้นจึงนิยมเก็บจากต้นเมื่อแก่เต็มที่ แล้วบ่มให้สุกก่อนรับประทาน เช่น อกร่อง น้ำดอกไม้ หนังกกลางวัน โชคอนันต์

3) มะม่วงที่ปลูกเพื่ออุตสาหกรรมแปรรูปผลไม้ เป็นมะม่วงที่มีผลดกมาก เมื่อแก่จัดมีรสเปรี้ยว เมื่อสุกจะมีรสหวานอมเปรี้ยวหรือจัดชิด

- มะม่วงสำหรับดอง เช่น แก้ว โชคอนันต์ เป็นต้น
- มะม่วงสำหรับบรรจุกระป๋อง ทำน้ำคั้น แช่อิ่ม เช่น มะม่วงสามปี มหาชนก เป็นต้น

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้มะม่วงน้ำดอกไม้ เนื่องจากเป็นมะม่วงที่นิยมบริโภคสุก เนื่องจากให้รสชาติดี และมีการปลูกในปริมาณมาก ทั้งยังมีการส่งออกในปริมาณที่สูงเมื่อเทียบกับมะม่วงพันธุ์อื่นๆ

ตารางที่ 1 คุณค่าทางโภชนาการของมะม่วง: 100 กรัม

Composition	Amount
Water	80.5 - 83 g
Protein	0.4 – 0.8 g
Fat	0.2 - 0.6 g
Carbohydrate	
-Sucrose	7 - 11 g
-Glucose	0.5 – 2 g
-Fructose	2 – 3.5 g
Dietary fiber	1.7 g
Calcium	10 - 20 mg
Phosphorus	10 - 17 mg
Iron	0.3 – 0.5 mg
Sodium	3 – 7 mg
Potassium	168 - 214 mg
Copper	897 mg
Magnesium	18 mg
Beta-carotene	0.06 – 2.37 mg
Vitamin C	27.8 - 55 mg
Citric acid	200 - 327 mg
Malic acid	0.07 mg
Tartaric acid	0.08 mg
Glycolic acid	0.06 mg

ที่มา: Souci (1994)

1.1 การเก็บเกี่ยว

การเก็บเกี่ยวมะม่วงต้องเก็บระยะที่มีความแก่ที่เหมาะสม เพราะจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของมะม่วง มะม่วงที่เก็บเกี่ยวในระยะที่ยังไม่แก่จัด บ่มสุกช้า เมื่อสุกจะมีรสเปรี้ยว กลิ่นจะไม่หอม ผลเหี่ยวมากเนื่องจากสูญเสียน้ำมาก มะม่วงที่เก็บเกี่ยวในระยะที่มีความแก่เหมาะสม เมื่อสุกจะมีรสหวาน กลิ่นหอม ผลไม่เหี่ยว ส่วนมะม่วงที่เก็บในระยะที่แก่จัดมากเกินไป หรือที่เรียกว่า สุกปากตะกร้อ เมื่อสุกจะมีคุณภาพไม่ดี คือ เนื้อนิ่มมากและเนื้อบริเวณใกล้เมล็ดจะดำ ซึ่งอายุการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมของมะม่วงแต่ละพันธุ์จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น แหล่งที่ปลูก ฤดูกาลที่มะม่วงออกดอกและติดผลจนกระทั่งผลโต การให้น้ำ ความชื้นในดิน การตัดแต่ง การใช้สารเคมีฉีดพ่น ตำแหน่งของผลในทรงพุ่ม (สายชล, 2533) มะม่วงแต่ละพันธุ์มีการเจริญเติบโตแตกต่างกัน ดังนั้นดัชนีที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวสามารถทำได้หลายวิธี แต่ละวิธีใช้ได้กับมะม่วงบางพันธุ์เท่านั้น ซึ่งมีดังต่อไปนี้

1.1.1. การดูลักษณะภายนอกของผล

การดูลักษณะภายนอกของผล ได้แก่ การดูนวล มะม่วงเกือบทุกพันธุ์เมื่อแก่จัด นวลหรือไขที่ผิวจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะมะม่วงที่มีผิวสีเขียวเข้ม เช่น เขียวเสวย ทองคำ จะมีนวลสีขาวหนาเห็นได้ชัดเจน แต่ควรดูขนาดของผลด้วย มะม่วงที่แก่ผลจะเต่ง หัวอูม ส่วนของไหล่ผลจะสูงกว่าหัวผล (สายชล, 2533)

1.1.2. การนับอายุของผลมะม่วง

การนับอายุของผลมะม่วง เป็นวิธีที่นิยมใช้เพื่อหาความแก่ที่เหมาะสมของผลมะม่วง อาจนับอายุตั้งแต่วันที่ช่อดอกเริ่มบาน 50% หรือบานเต็มที่ หรือตั้งแต่ผลขนาดเล็กเท่าเมล็ดถั่วเขียวเริ่มติดผลแล้ว จนกระทั่งถึงวันที่เก็บเกี่ยวได้ วิธีนี้เป็นวิธีง่ายและสะดวกแต่จะต้องบันทึกอายุของผลเก็บเกี่ยวได้เป็นเวลาติดต่อกันมากกว่าหนึ่งฤดูกาลของการออกดอกติดผล จึงจะนำมาใช้และได้ผลดี (สายชล, 2533)

ตารางที่ 2 ตัวอย่างของการนับอายุของมะม่วงเพื่อการเก็บเกี่ยว (บางพันธุ์) ดังนี้

พันธุ์	อายุการเก็บเกี่ยว (วัน)	นับตั้งแต่
เขียวเสวย	110	เริ่มออกดอก
น้ำดอกไม้	100	ดอกบานเต็มที่
หนังกลางวัน	110 - 115	ดอกบานเต็มที่
ทองดำ	102	ดอกบานเต็มที่
ฟ้าลั่น	70	หลังช่อดอกติดผล 50%
แรด	77	หลังช่อดอกติดผล 50%
พิมเสน	95	ดอกบานเต็ม

ที่มา: วัฒนา (2541)

1.1.3. ความถ่วงจำเพาะ

เมื่อผลมะม่วงมีอายุมากขึ้น การเพิ่มของน้ำหนักผลจะมากกว่าการเพิ่มขนาดหรือปริมาตรของผล ส่งผลให้ความถ่วงจำเพาะมีค่ามากขึ้น การหาความถ่วงจำเพาะของผลมะม่วงจะสังเกตจากลักษณะการจมและลอยของผลในน้ำ ผลมะม่วงที่มีอายุต่างกันจะมีการจมและลอยในน้ำแตกต่างกันเพราะมีความถ่วงจำเพาะต่างกัน ผลแก่จะมีความถ่วงจำเพาะมากกว่าผลอ่อน โดยผลอ่อนจะลอยน้ำและผลแก่จะจมน้ำ ซึ่งความถ่วงจำเพาะไม่สามารถใช้เป็นดัชนีในการเก็บเกี่ยวมะม่วงได้ทุกพันธุ์ โดยจะใช้ได้เฉพาะกับมะม่วงที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 1 ผลมะม่วงบางพันธุ์เมื่อแก่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า 1 เพราะมีช่องว่างระหว่างเมล็ดและเปลือกหุ้มเมล็ดชั้นนอก (endocarp) มาก จึงไม่สามารถใช้วิธีนี้ได้และผลมะม่วงบางพันธุ์พอเริ่มแก่จะจมน้ำ ดังนั้น อาจทำให้ได้ผลมะม่วงที่มีความแก่ไม่เหมาะสม เมื่อสุกจะมีรสค่อนข้างเปรี้ยว ความถ่วงจำเพาะของมะม่วงบางพันธุ์แสดงดังในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความถ่วงจำเพาะการจมน้ำ และช่องว่างระหว่างเมล็ดกับเปลือกหุ้มเมล็ดชั้นนอกของมะม่วงบางพันธุ์

พันธุ์	ความถ่วงจำเพาะ	การจมน้ำ	ช่องว่างระหว่างเมล็ดกับเปลือกหุ้มเมล็ดชั้นนอก
มะลิลา	0.98	ลอย	มาก
ทองคำ	1.01	จม	น้อย
ลิ้นงูเห่า	1.03	ลอย	น้อย
เขียวเสวย	0.97	ลอย	มาก
แรด	0.99	ลอย	มาก
พิมเสนมัน	1.00	ลอย	มาก
หนองแขง	0.99	ลอย	มาก
มันแก้ว	1.04	จม	น้อย
น้ำดอกไม้	1.03	จม	น้อย
หนังกลางวัน	1.03	จม	น้อย

ที่มา: สายชล (2533)

1.1.4. ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในน้ำต่อปริมาณกรด

ผลของมะม่วงเมื่อมีอายุมากขึ้นจะมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำต่อปริมาณกรดเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลมะม่วงที่มีอายุมากจะมีปริมาณน้ำตาลเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณกรดจะลดลง มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้จะมีคุณภาพสูงสุดเมื่อเก็บเกี่ยวผลมะม่วงที่มีอายุ 95 – 111 วัน หลังจากติดผล ซึ่งมีอัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำต่อปริมาณกรดมากกว่า 16 (ดวงตรา, 2526)

1.1.5. ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในน้ำ

ผลมะม่วงเมื่อมีอายุเพิ่มขึ้นจะมีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในน้ำเพิ่มขึ้น โดยผลมะม่วงน้ำดอกไม้ที่มีอายุ 84 – 90 วัน มีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในน้ำ 10 – 10.5 %

และเมื่อสุกจะเพิ่มขึ้นเป็น 19 % ส่วนผลมะม่วงที่มีอายุ 93 – 111 วัน มีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในน้ำ 10.5 – 12 % และเมื่อสุกจะเพิ่มขึ้นเป็น 20 - 21 % (ดวงตรา, 2526)

1.2 การสุกของผลไม้

การสุกของผลไม้หลังจากเก็บเกี่ยวมีการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ดังนี้

1.2.1. การเปลี่ยนสี

เมื่อผลมะม่วงสุกมีการเปลี่ยนแปลงสีผิวจากสีเขียวเป็นสีเหลืองและเปลี่ยนสีเนื้อจากสีขาวเป็นสีเหลือง เนื่องจากการสลายของคลอโรฟิลล์ทำให้คาร์โรทีนอยด์ (Carotenoid) ที่มีอยู่ปรากฏให้เห็นเด่นชัด (ธีราพร, 2536) โดยในมะม่วงน้ำดอกไม้เมื่อสุกพบว่ามีค่า L^* , มีค่าลดลง ในขณะที่มีค่า a^* และ b^* เพิ่มขึ้นเมื่อผลมะม่วงมีระยะการสุกเพิ่มมากขึ้น (ธีระ, 2545) มะม่วงเมื่อสุกจะมีสีเหลืองซึ่งคาร์โรทีนอยด์ในมะม่วงส่วนใหญ่จะเป็นเบต้าแคโรทีน (Beta-carotene) โดยมีอยู่ประมาณ 60 % และจะเพิ่มขึ้นเมื่อสุกเพิ่มขึ้น (ศุติพร, 2540) โดยผลมะม่วงน้ำดอกไม้ที่มีอายุ 84 วัน หลังติดผล เมื่อสุกจะมีปริมาณเบต้าแคโรทีน 2,286 ไมโครกรัมต่อ 100 กรัม และเพิ่มขึ้นจนมีปริมาณสูงสุด 4,770 ไมโครกรัมต่อ 100 กรัม เมื่อผลมะม่วงมีอายุ 111 วัน (ดวงตรา, 2526)

1.2.2. การเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัส

ลักษณะเนื้อสัมผัสเป็นลักษณะที่สำคัญของผลไม้ ผลไม้จะมีโมเลกุลของเพกติน (Pectin) ช่วยในด้านลักษณะเนื้อสัมผัส ในผลไม้ดิบซึ่งมีความแข็งกรอบเพกตินจะอยู่ในรูปที่ซับซ้อนและไม่ละลายน้ำเรียกว่าโปรโตเพกติน (Protopectin) เมื่อผลไม้เริ่มสุกโปรโตเพกตินจะถูกสลายเป็นเพกตินที่ละลายน้ำ จึงทำให้ผนังเซลล์ยึดติดกันอย่างหลวมๆ ผลไม้สุกจึงมีลักษณะที่นิ่มขึ้น (ศุติพร, 2540)

1.2.3. การเปลี่ยนแปลงคาร์โบไฮเดรต

เมื่อผลไม้เริ่มสุกจะมีรสหวาน เพราะแป้งที่สะสมในระหว่างการเจริญเติบโตจะเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาล ซึ่งจะเกิดขึ้นในผลไม้ประเภทไคลแมคเทอริก (Climacteric) โดยชนิดและ

ปริมาณน้ำตาลที่พบในเนื้อมะม่วงส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลซูโครส รองลงมาคือ น้ำตาลฟรุกโตสและกลูโคส ตามลำดับ (Souci *et al.*, 1994) พบว่าปริมาณน้ำตาลมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อผลมะม่วงมีระยะการสุกเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ามะม่วงที่สุกหลังการเก็บเกี่ยวมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลสูงกว่ามะม่วงที่สุกบนต้น (ธีระ, 2545)

1.2.4. การเปลี่ยนแปลงกรดอินทรีย์

โดยทั่วไปปริมาณกรดในผลไม้จะเพิ่มขึ้นจนมากที่สุดในช่วงการเจริญเติบโตอยู่บนต้น เนื่องจากวัฏจักรเครบส์ (Krebs' cycle) ดังนั้นเนื้อเยื่อของผลไม้จึงพบกรดซิตริก (Citric acid) และกรดมาลิก (Malic acid) มาก กรดที่พบมะม่วงน้ำดอกไม้ส่วนใหญ่เป็นกรดซักซินิก (Succinic acid) รองลงมาคือ กรดมาลิกและกรดซิตริกตามลำดับ ส่วนกรดชนิดอื่นๆ พบในปริมาณน้อย ซึ่งปริมาณกรดมีแนวโน้มลดลงเมื่อผลมะม่วงมีระยะการสุกเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ามะม่วงที่สุกหลังการเก็บเกี่ยวมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดสูงกว่ามะม่วงที่สุกบนต้น (ดวงตรา, 2526; ธีระ, 2545; Selvaraj *et al.*, 1989)

1.2.5. การเปลี่ยนแปลงกลิ่นรส

การเกิดกลิ่นรสของผลไม้ระหว่างสุก เนื่องจากเกิดสารระเหย (Volatiles) หลายชนิด เช่น เอสเทอร์ แอลดีไฮด์ แอลกอฮอล์ คีโตน เทอร์พีน สารระเหยเหล่านี้จะเกิดในช่วงไคลแมกเทอริก (Climacteric stage) สารระเหยนี้มีอยู่ในปริมาณน้อยแต่ให้กลิ่นรสกับผลไม้ โดยในมะม่วงน้ำดอกไม้ไม่มีกรดบิวทีริก (Butyric acid) เป็นสารหอมระเหยหลัก รองลงมาคือ สารเบต้าไพเนน (Beta-pinene) โดยมะม่วงที่สุกหลังการเก็บเกี่ยวจะพบสารทรีแคเรน (3-carene) และเบต้าเฟลแลนดรีน (Bata-phellandrene) ด้วย ปริมาณสารหอมระเหยที่พบส่วนใหญ่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อผลมะม่วงมีระยะการสุกเพิ่มขึ้น (ธีระ, 2545; ศุภพร, 2540)

2. การแช่เยือกแข็งอาหาร

การแช่เยือกแข็งเป็นวิธีการลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำกว่าจุดเยือกแข็งโดยส่วนของน้ำจะเปลี่ยนสภาพไปเป็นผลึกน้ำแข็ง ซึ่งจะลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำลงจนถึงระดับที่สิ่งมีชีวิตไม่สามารถจะดำเนินปฏิกิริยาทางชีวเคมีต่อไปได้ โดยทั่วไปมักจะเป็นที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส

หรือต่ำกว่า ซึ่งการตรึงน้ำกับน้ำแข็งและผลจากการเข้มข้นขึ้นของตัวละลายในน้ำที่ยังไม่แข็งตัวจะทำให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตีของอาหารมีค่าลดลง และเพื่อมิให้น้ำเหล่านั้นเข้าไปทำหน้าที่ในปฏิกิริยาเคมีต่างๆ และไม่เป็นสารตั้งต้นให้กับเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนมากับอาหารสามารถนำไปใช้ในการเจริญได้ (ศิรินทรา, 2544; วิไล, 2546)

2.1 ขั้นตอนการเกิดการแช่เยือกแข็งอาหาร

การแช่เยือกแข็งเป็นกรรมวิธีการถ่ายเทความร้อนระหว่างผลิตภัณฑ์กับสารให้ความเย็น โดยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ

2.1.1 การลดลงของอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จากอุณหภูมิเริ่มต้นถึงอุณหภูมิเยือกแข็ง (period of temperature decreasing)

จุดเยือกแข็งของอาหารทุกชนิดจะต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (ต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส) เนื่องจากน้ำภายในเซลล์ของอาหารจะมีสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์หลายชนิดละลายอยู่ซึ่งผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิจุดเยือกแข็งที่แตกต่างกัน

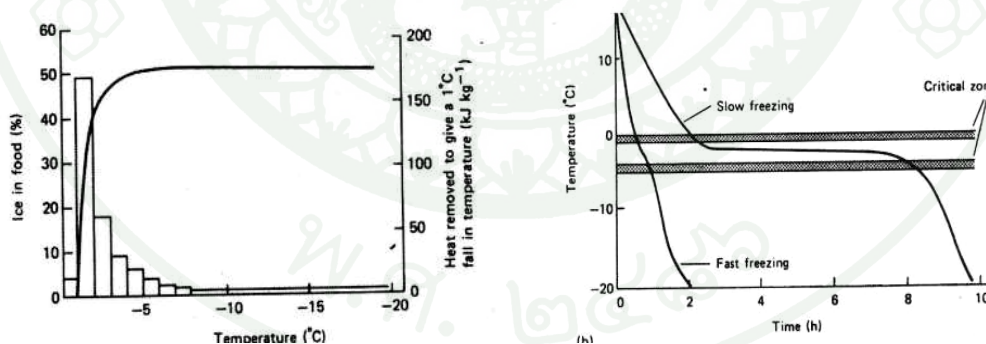
2.1.2 ขั้นตอนของการตกผลึกเป็นน้ำแข็ง (Period of ice crystal formation)

การเกิดผลึกของน้ำแข็งคือการรวมตัวอย่างเป็นระเบียบของส่วนที่เป็นของแข็ง โดยเกิดปรากฏการณ์ 2 อย่างต่อเนื่องกันได้แก่ การก่อนิวเคลียสผลึก (Nucleation) และการเพิ่มขนาดของผลึก (Crystal Growth)

การก่อนิวเคลียสผลึก (Nucleation) คือปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของน้ำมารวมตัวกันอย่างเป็นระเบียบจนเป็นโมเลกุลเล็ก ๆ ขึ้น ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางของผลึกต่อไป โดยเมื่อความร้อนถูกกำจัดออกจากระบบไปแล้ว จนกระทั่งผ่านสภาพที่เรียกว่าการทำให้เย็นยิ่งยวด (Super cooling) ซึ่งคือการที่อุณหภูมิของน้ำในอาหารลดต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์แต่ยังไม่เกิดผลึก จากนั้นจะมีการชักนำให้เกิดผลึกและอุณหภูมิจะขึ้นมาอยู่ที่จุดเยือกแข็งของอาหารความร้อนจะถูกกำจัดออกไปในรูปของความร้อนแฝงของน้ำ (Latent heat) ทำให้น้ำเปลี่ยนจากของเหลวเป็นของแข็ง โดยเริ่มต้นจากการเกิดนิวเคลียสผลึกก่อน อัตราการเกิดนิวเคลียสผลึกจะเร็วมากเมื่อ

อุณหภูมิลดลง ระยะเวลาของการเย็นยิ่งยวดขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารและอัตราการกำจัดความร้อนออกไป โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงนี้จะทำให้เกิดนิวเคลียสจำนวนมาก โมเลกุลของน้ำจะเคลื่อนที่ไปยังนิวเคลียสที่มีอยู่เพื่อสร้างนิวเคลียสขึ้นมาใหม่ การแช่เยือกแข็งโดยรวดเร็วจึงทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กๆ

ขั้นตอนต่อไปคือ การเพิ่มขนาดของผลึก (Crystal Growth) หลังจากที่เกิดนิวเคลียสผลึกจำนวนมากพอจะเกิดการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็ง ซึ่งเกิดได้ที่อุณหภูมิใกล้จุดหลอมเหลว โดยโมเลกุลของน้ำจะเคลื่อนตัวเข้ามาเกาะอยู่กับนิวเคลียสผลึกมากกว่าที่จะก่อเกิดนิวเคลียสใหม่ เพราะโมเลกุลของน้ำในสภาวะที่เป็นของเหลวมีขนาดเล็กและเคลื่อนที่ได้ในอัตราที่สูง และจะหยุดเมื่อกระทบกับผิวหน้าของนิวเคลียสผลึก โดยขนาดของผลึกน้ำแข็งจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารรวมทั้งวิธีการแช่เยือกแข็งเริ่มต้น ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนส่วนใหญ่ในช่วงของการแช่เยือกแข็งจะเป็นตัวกำหนดการเติบโตของผลึกน้ำแข็ง อัตราการถ่ายเทมวล (ของน้ำที่เคลื่อนที่ไปยังผลึกที่โตขึ้นและของสารละลายที่เคลื่อนที่ออกจากผลึก) ไม่ได้เป็นตัวควบคุมอัตราการเติบโตของผลึกยกเว้นในช่วงปลายของการตกผลึกเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้น เวลาที่ใช้สำหรับอาหารที่จะผ่านช่วงวิกฤติจึงเป็นตัวกำหนดทั้งขนาดและจำนวนของผลึกน้ำแข็ง (ดังภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 การแช่เยือกแข็ง : (ซ้าย) การเกิดผลึกน้ำแข็งที่อุณหภูมิเยือกแข็งต่าง ๆ

(ขวา) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอาหารผ่านช่วงวิกฤติ

ที่มา: วิไล (2546)

2.1.3 ขั้นตอนการลดลงของอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ต่อไปจนถึง -18 ถึง -20 องศาเซลเซียส

ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งโดยทั่วไป หลังจากเครื่องแช่เยือกแข็งดึงความร้อนจากอาหาร ทำให้อุณหภูมิของอาหารลดลงมาถึง -18 องศาเซลเซียส จะนำมาเก็บไว้ในห้องเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า -18 องศาเซลเซียส อัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งมีผลต่อคุณสมบัติต่างๆของผลิตภัณฑ์ ทั้งทางเคมีและทางฟิสิกส์

2.2. เครื่องแช่เยือกแข็งอาหาร

เครื่องแช่เยือกแข็งที่ใช้ในอุตสาหกรรมแช่เยือกแข็งโดยทั่วไป

2.2.1 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบเป่าลมเย็นจัด (Air-blast freezer)

อากาศจะหมุนเวียนอยู่บนอาหารที่อุณหภูมิระหว่าง -30 องศาเซลเซียสและ -40 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็ว 1.5-6.0 เมตร/วินาที ความเร็วลมที่สูงนี้จะลดความหนาของฟิล์มรอบอาหารและช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน อาหารจะถูกวางบนถาดในช่องหรือตู้ในเครื่องแช่เยือกแข็งแบบกะ เครื่องแช่เยือกแข็งที่ทำงานแบบต่อเนื่องประกอบด้วยรถเข็นซึ่งมีถาดอาหารหรือสายพานนำอาหารผ่านอุโมงค์ที่อุณหภูมิความร้อน การไหลของลมอาจจะขนานหรือตั้งฉากกับอาหารโดยต้องบังคับให้ไหลผ่านอาหารอย่างทั่วถึงทุกชั้น

ข้อดีของวิธีนี้คือ จะให้ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และมีความยืดหยุ่นสูง เนื่องจากสามารถใช้กับอาหารที่มีขนาดและรูปร่างต่างๆ กัน เครื่องมีขนาดกะทัดรัดและใช้เงินทุนค่อนข้างต่ำ ส่วนข้อเสียคือการที่ใช้ลมปริมาณมากอาจทำให้เกิดการไหม้เนื่องจากอากาศเย็น และอาหารที่ไม่ได้ผ่านการบรรจุเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายขึ้น ความชื้นจากอาหารจะเคลื่อนย้ายไปยังอากาศและทำให้เกิดน้ำแข็งบนขวดลดความเย็น ทำให้ต้องมีการละลายน้ำแข็งบ่อยครั้ง (วิไล, 2546)

2.2.2 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบใช้ไครโอเจน (Cryogenic freezer)

เป็นวิธีการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิต่ำมาก และมีอัตราการแช่เยือกแข็งเร็วมาก อาหารบรรจุหรือไม่บรรจุในภาชนะบรรจุจะสัมผัสกับสารให้ความเย็นโดยตรงในขณะที่สารให้ความเย็นมีการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งหรือของเหลวเป็นก๊าซ ซึ่งจะดึงความร้อนออกจากอาหาร ทำให้อาหารมีอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว สารให้ความเย็นที่ใช้ เช่น ไนโตรเจนเหลว ซึ่งมีจุดเดือดต่ำมาก คือ -195.81 องศาเซลเซียส อัตราการแช่เยือกแข็งของวิธีนี้จะเร็วกว่าเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าและแบบแผ่นสัมผัส (Plate freezing) มาก แต่จะเร็วกว่าแบบฟลูอิดไดส์ เบด (Fluidized-bed freezing) และแบบจุ่มในของเหลวเย็นจัด (Liquid immersion freezing) เล็กน้อย

ข้อดีของวิธีนี้คือ อาหารมีการสูญเสียความชื้นน้อยมาก คือ น้อยกว่า 1% เนื่องจากอัตราการแช่เยือกแข็งเร็วมาก ลดการสัมผัสกับออกซิเจนทำให้ลดปฏิกิริยาทางเคมีที่ไม่ต้องการ และลดความเสียหายเนื่องจากการแช่เยือกแข็ง ส่วนข้อเสีย คือ สารไครโอเจนมีราคาค่อนข้างสูง ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการจึงสูง (สุลัพร, 2540; วิไล, 2546)

สุลัพร (2540) ศึกษาผลของชนิดเครื่องแช่เยือกแข็ง 2 ชนิด คือแบบลมเป่าและแบบไครโอเจนที่มีต่อมะม่วงน้ำดอกไม้และโชคอนันต์แช่เยือกแข็ง พบว่า ผลผลิตทันทีที่แช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบแบบไครโอเจนจะสูญเสียน้ำหนักหลังละลายน้ำแข็งและเกิดสีน้ำตาลน้อยกว่า มีความแน่นเนื้อ ปริมาณวิตามินซี คงแน่นด้านสี ลักษณะเนื้อสัมผัส และความชอบรวมสูงกว่าผลผลิตทันทีที่แช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบแบบลมเป่า

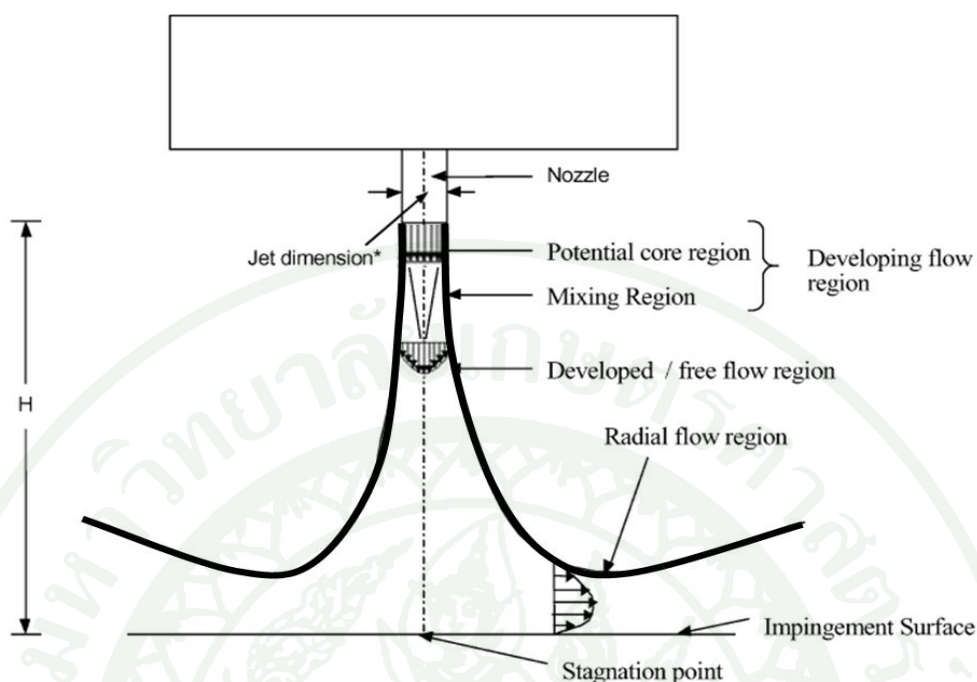
2.2.3 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบเป่าปะทะไอพ่น (Jet-Impingement freezer)

การแช่เยือกแข็งแบบเป่าปะทะไอพ่น เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งนับว่าเป็นทางเลือกใหม่สำหรับอุตสาหกรรมแช่เยือกแข็ง โดยใช้หลักการที่ว่าเมื่อมีการควบคุมทิศทางและความเร็วลมได้อย่างเหมาะสม อัตราการแช่เยือกแข็งอาหารจะถูกเร่งให้สูงขึ้นได้อย่างมาก มีการศึกษาเบื้องต้นว่าการแช่เยือกแข็งแบบนี้สามารถทำให้อัตราการแช่เยือกแข็งเร็วเทียบเท่ากับการแช่เยือกแข็งแบบเย็นยิ่งยวดที่ใช้ไนโตรเจนเหลวเป็นสารให้ความเย็น ซึ่งถือเป็นค่าใช้จ่ายที่คุ้มค่าเนื่องจากเป็นสารที่มีราคาแพง และมีการใช้ในปริมาณที่สูง ในระหว่างการผลิตอาหารแช่เยือกแข็งและยังมีการสูญเสียไปในรูปก๊าซที่ระเหยออกจากภาชนะบรรจุอยู่ตลอด

เวลาอีกด้วย ดังนั้นจึงมักใช้กระบวนการแช่เยือกแข็งแบบเย็นยิ่งยวดนี้กับผลิตภัณฑ์ที่มักมีราคาแพง ส่วนการแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าปะทะไอฟันมีต้นทุนของกระบวนการแช่เยือกแข็งที่มีราคาถูกลงกว่า การใช้การแช่เยือกแข็งแบบเย็นยิ่งยวดที่ใช้ในโตรเจนเหลวอย่างมาก (Rodolfo and Viviana, 2002) ดังนั้นจึงทำให้เกิดแนวคิดที่จะนำเทคโนโลยีการแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าปะทะไอฟันมาทดแทนการแช่เยือกแข็งแบบเย็นยิ่งยวดที่ใช้ในโตรเจนเหลว

หลักการแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าปะทะไอฟันเป็นการใช้ลมเย็นความเร็วสูงพุ่งเข้าปะทะในแนวตั้งตั้งฉากกับผิวด้านหน้า และ/หรือผิวด้านหลังของอาหาร โดยตรงเพื่อทำลายชั้นของฉนวนอากาศที่ผิวผลิตภัณฑ์และสร้างกระแสลมที่ปั่นป่วน (Turbulent flow) ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลอากาศสูงขึ้น โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนจากเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าปะทะไอฟันสูงกว่าเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า (Air-blast freezer) ที่ใช้กระแสลมหมุนวน (Laminar flow) หรือไหลผ่านแบบดั้งเดิม 2 ถึง 3 เท่า ทำให้เกิดการใช้ลมเย็นอย่างมีประสิทธิภาพเต็มที่ (ดังภาพที่ 2 และ 3) การแช่เยือกแข็งแบบนี้สามารถใช้ลมที่มีความเร็วสูงมากได้ มีการศึกษาทดลองใช้ความเร็วลมในช่วงประมาณ 10 -100 เมตร/วินาที ซึ่งให้ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งสูงมาก และมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้สูงถึง 400 วัตต์/เคลวิน.ตารางเมตร โดยพบว่าความเร็วที่เหมาะสมสำหรับเครื่องแช่เยือกแข็งอาหารนั้นอยู่ที่ประมาณ 20 -40 เมตร/วินาที (Soto and Borquez, 2001) และพบว่าเวลาที่ใช้ในการผลิตของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าปะทะไอฟันต่ำกว่าเวลาที่ใช้นใน เครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์สายพานทั่วไป (Conventional belt tunnel) (Salvadori and Mascheroni, 2002) แต่อย่างไรก็ตาม เวลาในการแช่เยือกแข็งนั้นขึ้นกับอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอาหาร (Soto and Borquez, 2001)

โดยลักษณะของเครื่องจะมีตะแกรงหรือสายพานสำหรับวางผลิตภัณฑ์ โดยจะมีลำอากาศพุ่งผ่านตะแกรงทั้งด้านบนล่าง และจะมีห้องสำหรับเก็บอากาศเย็นและความดัน อากาศจะเคลื่อนผ่านหัวเป่าลม (Nozzle) ออกมา โดยรูปร่างของหัวเป่าลมจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศและผลิตภัณฑ์ ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับ ระยะระหว่างหัวเป่าลมกับผิวน้ำของผลิตภัณฑ์ (H) เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเป่าลม (D) และช่องว่างระหว่างหัวเป่าลม (Salvadori and Mascheroni, 2002) จากการศึกษาโดยใช้ความเร็วลม 10-100 เมตร/วินาที พบว่าอัตราส่วนระหว่าง H/D ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6-8 (Sarkar and Singh, 2004)



ภาพที่ 2 ลักษณะการไหลของลำอากาศในเครื่องแช่เยือกแข็งแบบเป่าปะทะ

ที่มา: Sarkar and Singh (2004)

กลไกการไหลของลำอากาศ แบ่งออกเป็น 3 บริเวณ คือ

1) Free jet region

การไหลของลำอากาศในช่วงนี้จะเกิดขึ้นก่อน เมื่อมีลำอากาศพุ่งออกมาจากหัวเป่าลม (nozzle) โดยจะเกิดการไหลแบบ Laminar ($Re < 2000$) และ Turbulent ($Re > 3000$) รวมกัน เป็นช่วงที่ยังไม่มีการพัฒนาของลำอากาศอย่างเต็มที่ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนยังมีค่าต่ำ เนื่องจากยังเกิดการไหลแบบ Laminar อยู่ด้วยในบริเวณใจกลางของลำอากาศ ส่วนการไหลแบบ Turbulent จะเกิดบริเวณรอบนอกของลำอากาศ เป็นผลมาจากแรงเสียดทานที่เกิดตรงผิวรอยต่อของลำอากาศ โดยยังสามารถแบ่งย่อยได้อีก 3 ช่วง คือ

- Potential core region ตรงจุดศูนย์กลางจะมีความเร็วเท่ากับความเร็วที่พุ่งออกจากหัวเป่าลม

- Developing flow region จะเริ่มมีการไหลแบบ Turbulent
- Developed flow region (fully developed zone) ในช่วงนี้ จะเกิดการไหลที่สมบูรณ์ คือเกิดการไหลแบบ Turbulent เพียงอย่างเดียว สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในช่วงนี้จะมีค่าสูง โดยปกติถ้าต้องการแช่เยือกแข็งอาหารด้วยวิธีนี้ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดควรวางอาหารให้อยู่ในระยะที่เกิด Developed flow region พอดี

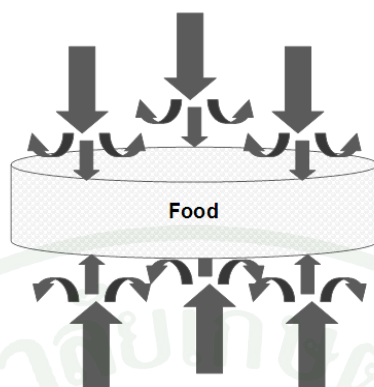
2) Stagnation region

เป็นช่วงที่ลำอากาศสัมผัสกับผิวหน้าอาหาร โดยยังมีแรงกระทำจากทิศทางลมในแนวตั้ง จึงไม่เกิดการเคลื่อนที่ในแนวระนาบของลำอากาศ โดยจุดกึ่งกลางของลำอากาศที่ตกกระทบอาหาร จะเรียกว่า Stagnation point จะเกิดกลไกการถ่ายเทความร้อนที่มากที่สุด (มีประสิทธิภาพมากที่สุด) และจะลดลงเมื่อระยะห่างออกจากจุดนี้มากขึ้น

3) Wall jet region (radial flow or lateral spread region)

เมื่อลำอากาศตกกระทบผิวอาหารที่บริเวณ Stagnation region และเกิดการเคลื่อนที่ไปในแนวราบหรือแนวรัศมี การเคลื่อนที่ในช่วงนี้จะเรียกว่า radial flow หรือ wall jet region ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลง เมื่อเคลื่อนที่จากจุด Stagnation point มากขึ้น (Sarkar *et al.*, 2004; Sarkar and Singh, 2004; Burwash *et al.*, 2006)

สำหรับอาหารที่เหมาะสมกับการแช่เยือกแข็งแบบนี้ คือ ผลิตภัณฑ์ที่มีสัดส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง เป็นแผ่นบาง เพราะผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะค่อนข้างหนาอาจจะเกิดการสูญเสียบริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ระหว่างแช่เยือกแข็งมากเกินไป นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดด้านรูปร่างของผลิตภัณฑ์ คือ ผลิตภัณฑ์จะต้องสามารถรับความเร็วลมสูงในแนวตั้งฉากได้

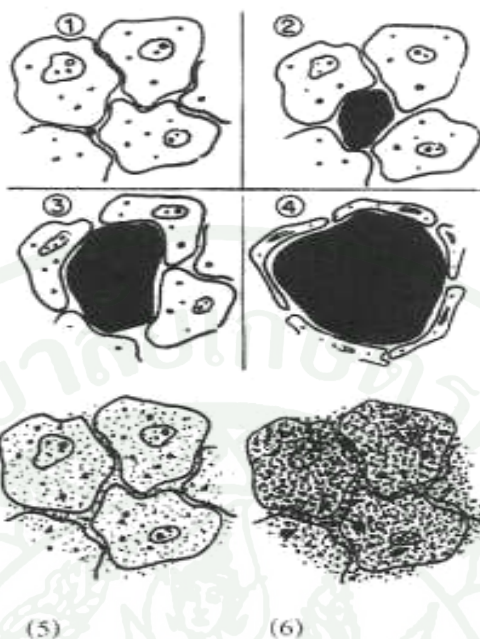


ภาพที่ 3 ลักษณะการไหลของลำอากาศที่พุ่งตั้งฉากผิวหน้าอาหารในเครื่องแช่เยือกแข็งแบบเป่าปะทะ

2.3 ผลกระทบของการแช่เยือกแข็ง

ผลกระทบของการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพอาหาร คือ เกิดความเสียหายเนื่องจากผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่อย่างไรการแช่เยือกแข็งมีผลต่อสี กลิ่น รส หรือ คุณค่าทางโภชนาการ น้อยมาก ซึ่งการสูญเสียดังกล่าวอาจเกิดในขั้นตอนการเตรียมหรือในระหว่างการแช่เยือกแข็ง โดยขนาดและบริเวณที่มีการก่อตัวของผลึกน้ำแข็งระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็งส่งผลต่อ ลักษณะเนื้อสัมผัสของผัก ผลไม้ และขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีที่นำมาใช้ ในการแช่เยือกแข็งอย่างช้า (ที่อัตราเร็วกว่า 1 องศาเซลเซียส/นาทีก) ในเซลล์พืช โดยทั่วไปจะทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งภายนอก ทำให้เซลล์เกิดความเสียหาย (Carbone et al., 2006) ลำดับการเกิดผลึกน้ำแข็งภายนอกเซลล์ในการแช่เยือกแข็งอย่างช้าแสดงใน 4 ภาพแรกในภาพที่ 4

เซลล์พืชซึ่งมี โครงสร้างเซลล์ที่แข็งแรงอย่างผักและผลไม้จะได้รับความเสียหายจากผลึกน้ำแข็งมากกว่าโครงสร้างเซลล์ที่แข็งแรงน้อยกว่า ขนาดความเสียหายขึ้นกับขนาดของผลึกน้ำแข็งและอัตราการถ่ายเทความร้อน ชนิด และคุณภาพของวัตถุดิบและวิธีการก่อนการแช่เยือกแข็งมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์มากเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากวิธีการแช่เยือกแข็ง การเก็บรักษาระหว่างการแช่เยือกแข็งและวิธีทำละลายน้ำแข็ง (วิไล, 2546)



ภาพที่ 4 ผลกระทบของการแช่เยือกแข็งต่อเนื้อเยื่อพืช: (1-4) การแช่เยือกแข็งแบบช้า
(5-6) การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว

ที่มา: วิไล (2546)

ภาพที่ 4 แสดงผลของอัตราการแช่เยือกแข็งต่อเซลล์เนื้อเยื่อพืชในระหว่างการแช่เยือกแข็งอย่างช้า ผลึกน้ำแข็งจะเติบโตขึ้น ช่องว่างระหว่างเซลล์สูญเสียรูปร่างและทำให้เซลล์ใกล้เคียงแตกด้วย ผลึกน้ำแข็งจะมีความดันไอน้ำต่ำกว่าบริเวณภายในเซลล์ น้ำจากเซลล์จึงเคลื่อนที่ไปยังผลึกที่เติบโตใหญ่ขึ้น เซลล์จึงสูญเสียน้ำและเกิดความเสียหายเนื่องจากความเข้มข้นของตัวถูกละลายสูงขึ้น ในการละลายน้ำแข็งในอาหารนี้ เซลล์จะไม่กลับมามีรูปร่างและความแข็งแรงเหมือนเดิม อาหารจะนิ่มและสารต่าง ๆ ในเซลล์จะไหลออกจากเซลล์เสียหายหรือที่เรียกว่า น้ำไหลซึม ส่วนการแช่เยือกแข็งอย่างรวดเร็ว ผลึกน้ำแข็งทั้งในเซลล์และในช่องว่างระหว่างเซลล์จะมีขนาดเล็ก จึงเกิดความเสียหายทางกายภาพเพียงเล็กน้อยและไม่เกิดความแตกต่างของความดัน เซลล์จึงสูญเสียให้น้อยมาก เนื้อสัมผัสของอาหารจึงยังคงอยู่ดังแสดงใน 2 ภาพล่างในภาพที่ 4 อย่างไรก็ดี ตามถ้านาขนาดเซลล์ลดลงอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งที่ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งอย่างสม่ำเสมอจะสูงขึ้น

3. การแช่เยือกแข็งผลไม้

การแช่เยือกแข็งผลไม้สามารถรักษาคุณภาพของผลไม้ด้านสี กลิ่นรส และลักษณะเนื้อสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการไว้ได้ดีกว่าการแปรรูปในแบบอื่น และผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังให้คุณภาพที่ใกล้เคียงผลไม้สดอีกด้วย และยังสามารถยับยั้งจุลินทรีย์ที่ทำให้ผลไม้เน่าเสีย ลดอัตราเร็วของจากปฏิกิริยาเอนไซม์ และปฏิกิริยาทางเคมีที่ไม่เป็นที่ต้องการได้โดยเป็นผลมาจากการลดอุณหภูมิให้ต่ำลงร่วมกับการลดปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์ให้เปลี่ยนสถานะไปเป็นผลึกน้ำแข็ง โดยทั่วไปเนื้อเยื่อของผลไม้มีน้ำตาลและกรดอยู่สูง จึงส่งผลให้มีจุดเยือกแข็งที่ต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส สำหรับมะม่วงมีจุดเยือกแข็งเฉลี่ยประมาณ -1 องศาเซลเซียส (Otero *et al.*, 2000) การแช่เยือกแข็งผลไม้ประกอบด้วยหลายขั้นตอน ซึ่งแต่ละขั้นตอนเป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผลไม้แช่เยือกแข็ง

3.1 การเตรียมวัตถุดิบก่อนการแช่เยือกแข็ง

3.1.1 การคัดเลือกวัตถุดิบ

ผลไม้ที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งต้องมีคุณภาพดี และมีการเก็บเกี่ยวในสภาวะที่เหมาะสม โดยทั่วไปผลไม้สำหรับการนำมาแช่เยือกแข็งมักจะใช้ผลไม้ที่มีระดับความสุกใกล้เคียงกับการนำมาบริโภค

3.1.2 การทำความสะอาด

เป็นการกำจัดสิ่งแปลกปลอมออก และเป็นการลดจำนวนจุลินทรีย์เบื้องต้นที่ติดมากับผลไม้ โดยต้องระวังให้เกิดการเสียหายหรือเกิดรอยชำกับเนื้อผลไม้

3.1.3 การคัดขนาดและคัดเลือกคุณภาพ

เพื่อให้ผลไม้มีความสม่ำเสมอทั้งขนาดและระดับความแก่ อาจใช้ขนาด น้ำหนัก หรือคัดโดยการใช้ความถ่วงจำเพาะ และคัดเลือกเอาผลที่มีความสมบูรณ์ไม่มีตำหนิ และอื่น ๆ ที่จำเป็น

3.1.4 การปกปิดเปลือกและการตัดแต่ง

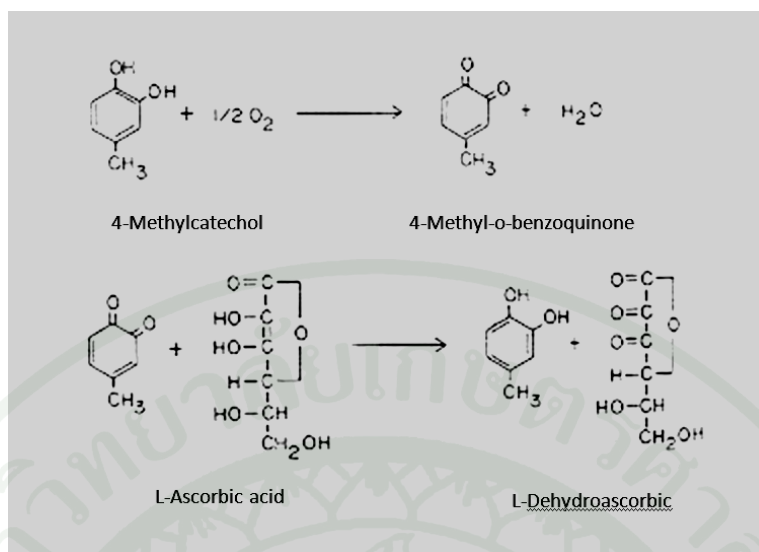
ผลไม้จะต้องมีการปกปิดเปลือกเพื่อกำจัดสิ่งที่เป็นอันตรายที่อาจติดมากับเปลือก และอาจมีการตัดแต่ง แล้วแต่ความต้องการและความเหมาะสมสำหรับการบรรจุและการบริโภค

3.1.5 การป้องกันการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเนื่องจากเอนไซม์ในผลไม้

ผลไม้เมื่อผ่านการปกปิดเปลือกและมีการตัดแต่ง ส่งผลให้เกิดการเสียหายของเนื้อเยื่อ เช่นรอยฉีกขาด รอยชำ ส่วนสัมผัสกับอากาศจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนของสารจำพวกฟีนอล (Phenol) และ โพลีฟีนอล (Polyphenol) โดยเอนไซม์ชนิดเดียว แต่มีชื่อเรียกต่าง ๆ กัน ได้แก่ ฟีนอลออกซิเดส (Phenoloxidase) ฟีนอลเลส (Phenolase) โพลีฟีนอลออกซิเดส (Polyphenol oxidase) และ โพลีฟีนอลเลส (Polyphenolase) (ศุทธิพร, 2540) สำหรับวิธีการยับยั้งการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเอนไซม์ที่นิยมใช้กับผลไม้คือการใช้สารเคมี และสารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ กรด โดยจะไปลด pH ทำให้เกิดสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ โดยเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส จะทำงานได้ที่ pH ระหว่าง 4-7 และเอนไซม์นี้จะมีปฏิกิริยาค่อนข้างมากที่ pH ต่ำกว่า 3 (สมพร, 2546) การเกิดสีน้ำตาลจึงลดลง กรดที่นิยมใช้ เช่น

1) กรดซิตริก (Citric acid) จะไปลด pH ทำให้เกิดสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ และเป็นตัวจับโลหะ เช่น ทองแดง ซึ่งจำเป็นต่อการทำงานของเอนไซม์ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการยับยั้งเอนไซม์สูงขึ้น

2) กรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid) นิยมนำมาใช้เพื่อยับยั้งเอนไซม์เช่นกัน เนื่องจากเป็นสารที่เป็นตัวรีดิวซ์ที่ดี โดยจะไปรีดิวซ์สารตั้งต้น (o-quinone) ก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยา polymerization จนได้สารประกอบสีน้ำตาล (melanin) ดังภาพที่ 5 ดังนั้นจึงสามารถเกิดการยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลได้ การใช้กรดแอสคอร์บิกนั้นต้องใช้ในปริมาณที่เพียงพอในการยับยั้งเอนไซม์ หากใช้กรดแอสคอร์บิกในปริมาณที่ไม่เพียงพอการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์จะเป็นเพียงแค่การชะลอปฏิกิริยาไว้เท่านั้น และจะเกิดขึ้นได้อีก แต่เนื่องจากกรดแอสคอร์บิกนั้นมีราคาแพงและไม่มีความคงตัว ถูกออกซิไดส์ได้ง่าย จึงมีการใช้ร่วมกับกรดชนิดอื่นๆ เช่น กรดซิตริก



ภาพที่ 5 ปฏิกริยาที่กรดแอสคอร์บิกช่วยยับยั้งการเกิดสีน้ำตาล

ที่มา: สววนศรี (2536)

สุลีพร (2540) ศึกษาผลของการยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลในชิ้นมะม่วงแช่เยือกแข็ง โดยใช้สารละลายผสมของกรดซิตริกและกรดแอสคอร์บิก พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลได้ดีที่สุด คือ การแช่ชิ้นมะม่วงในสารละลายผสมของกรดซิตริก 0.5 % กับ กรดแอสคอร์บิก 0.25 % เป็นเวลา 5 นาที

3.1.6 การชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลไม้ตัดแต่ง

การแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ สามารถช่วยปรับปรุงความกรอบของเนื้อผลไม้หลังการตัดแต่งได้ โดยช่วยให้เนื้อเยื่อของผลไม้มีความแข็งแรงและทนต่อการย่อยของเอนไซม์ที่หลั่งออกมาจากเนื้อเยื่อที่ได้รับความเสียหายจากการตัดแต่ง โดย Ca^{2+} จะเข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบเพคตินบริเวณ middle lamella และผนังเซลล์เกิดปฏิกิริยาเชื่อมข้าม (Crosslink) ระหว่างหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) บนสายโพลีกลาแลกทูโรไนด์ (Polygalacturonides) และประจุของ Ca^{2+} โดย Ca^{2+} ทำหน้าที่ดึงหมู่คาร์บอกซิลบนสายโพลีกลาแลกทูโรไนด์ สายหนึ่งให้จับกับหมู่คาร์บอกซิลของสายโพลีกลาแลกทูโรไนด์ อีกสายหนึ่งเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมเพคเตทซึ่งไม่ละลายน้ำ ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่เหมาะสมเป็นไปตามชนิดของ

ผลไม้ โดยทั่วไปแล้วความเข้มข้นที่เหมาะสมอยู่ระหว่างร้อยละ 0.1 - 1 หากใช้ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์สูงเกินไปอาจทำให้เกิดรสขมในเนื้อผลไม้ได้ นอกจากช่วยปรับปรุงความกรอบของผลไม้ตัดแต่งแล้ว ยังมีส่วนช่วยลดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล โดยจะมีผลทำให้เอนไซม์เกิดการเสียสภาพ จนไม่สามารถเข้าจับกับซับสเตรท ทำให้ไม่เกิดสีน้ำตาลที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเวลาในการแช่ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1-5 นาที (รัชฎา, 2548)

3.1.7 การลดความเสียหายของเซลล์จากการแช่เยือกแข็ง

เนื่องจากผลไม้มีน้ำเป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณมากถึงร้อยละ 85 – 90 เมื่อผ่านการแช่เยือกแข็งจะเกิดผลึกน้ำแข็งเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เยื่อหุ้มเซลล์และผนังเซลล์เกิดความเสียหาย ทำให้มีการสูญเสียน้ำจากการละลายมากขึ้น ส่งผลให้เนื้อสัมผัสของผลไม้ไม่นุ่มลง และยังสามารถส่งผลให้เกิดการสูญเสียกลิ่น รส และสารอาหารต่างๆ ดังนั้นการลดความเสียหายของเซลล์จากการแช่เยือกแข็งที่สามารถทำได้ คือการลดปริมาณน้ำบางส่วนก่อนการแช่เยือกแข็ง เพื่อให้เกิดปริมาณผลึกน้ำแข็งในเนื้อผลไม้ลดลง ส่งผลให้เซลล์เกิดความเสียหายน้อยลงด้วย ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีคุณภาพดีขึ้น (Li and Sun, 2002) ซึ่งวิธีออสโมซิสเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้การลดปริมาณน้ำในผลไม้ก่อนกระบวนการต่าง ๆ ทั้งการทำแห้ง และการแช่เยือกแข็ง โดยการใช้สารละลายน้ำตาล ซึ่งนอกจากจะเป็นการลดปริมาณน้ำแล้วน้ำตาลยังให้ความหวานและช่วยปรับปรุงรสชาติ และลักษณะเนื้อสัมผัส หรือรักษากลิ่นรส อีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ คือ กระบวนการอินฟิวชัน (Vacuum infusion) เป็นการเตรียมสำหรับผัก ผลไม้ก่อนจะเข้าสู่กระบวนการต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการทำแห้ง หรือการแช่เยือกแข็ง ซึ่งจะช่วยในการปรับปรุงคุณภาพ โดยสารต่างๆ ที่อยู่ในสารละลายจะสามารถเข้าไปในโครงสร้างเนื้อผัก ผลไม้ได้อย่างรวดเร็ว หลักการของเทคนิคนี้ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนด้วยกัน หลังจากที่ได้ผลิตภัณฑ์จุ่มอยู่ในสารละลายภายในระบบปิด ขั้นตอนแรก ความดันสุญญากาศที่นำมาใช้ในระบบปิดจะกระตุ้นให้เกิดการขยายตัวและการไหลออกของก๊าซภายในผลิตภัณฑ์ ก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาจากรูเปิดของผลิตภัณฑ์ซึ่งจะนำของเหลวภายในออกมาด้วย ขั้นตอนที่สองจะมีการปล่อยความดันบรรยากาศและเกิดการบีบอัดทำให้ปริมาตรของก๊าซที่มีอยู่ในรูพรุนลดลง และมีการไหลของของเหลวภายนอกเข้าสู่โครงสร้างที่เป็นรูพรุน และเมื่อเร็ว ๆ นี้ ได้มีการนำเทคนิคนี้มาใช้ในการพัฒนาเพื่อการเพิ่มคุณค่าทางอาหารให้แก่ผลิตภัณฑ์ ได้แก่ การเพิ่มวิตามินเกลือแร่ให้กับผลไม้ตัดแต่ง เช่น แอปเปิ้ล ลูกแพร์ ในผลิตภัณฑ์ผลไม้อบแห้งมากขึ้น การเพิ่มแคลเซียมในผัก สภาวะที่ใช้ของกระบวนการเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย เช่น อุณหภูมิ ชนิดและความเข้มข้นของสารละลาย ระดับความดัน เวลาในการจุ่มภายใต้ความดัน

เวลาในการพักไว้ที่สภาวะบรรยากาศ และอัตราส่วนระหว่างสารละลายกับตัวอย่าง โดย Mújica-Paz *et al.* (2003a, 2003b) พบว่า มีการใช้ความดันในช่วง 102-506 มิลลิเมตรปรอท และเวลาในช่วง 3-45 นาที สำหรับการอินฟิวชันในการผลิตผลไม้ขึ้นต่างๆ อย่างมะม่วง แอปเปิ้ล มะละกอ กัลยพืชมะลอน โดยพบว่าความดันที่น้อยกว่า 300 มิลลิเมตรปรอท จะสามารถดึงน้ำออกจากกรูพรูเนโครงสร้างของผลไม้ได้ดี



อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

มะม่วงน้ำดอกไม้ (Mangifera indica Linn.) เบอร์สี่ ซื้อจากตลาดสี่มุมเมือง กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ช่วงเดือนมีนาคม – มิถุนายน พ.ศ.2551 และ มีนาคม – มิถุนายน พ.ศ.2552

2. เครื่องมือและอุปกรณ์

- 2.1 เครื่องอินฟราเรด
- 2.2 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบ Jet impingement (บริษัท พัฒน์กล จำกัด (มหาชน))
- 2.3 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบ Cryogenic (Bangkok Industrial gas Co, Ltd.)
- 2.4 เครื่องบันทึกอุณหภูมิและเวลา (Prescica 2002, USA) พร้อมด้วยสาย Thermocouple (T Type, Duplex Insulated, Omega engineering, INC, USA)
- 2.5 ตู้แช่เย็น (SANYO, SR-F711NC, Thailand)
- 2.6 เครื่องปั่น (Moulinex, AY4671, China)
- 2.7 เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge) (Refrigerated centrifuge himac CR 20B2, Hitachi, Tokyo, Japan)
- 2.8 เครื่องวัดความแน่นเนื้อ (Texture analyzer) (TA.XT.Plus model, Stable Micro Systems Ltd, Godalming, UK)
- 2.9 เครื่องวัดสี (Miniscan XE, Hunter Lab Reston, Virginia, USA)
- 2.10 เครื่องชั่งละเอียด (Sartorius GM 1502, Germany)
- 2.11 Hand refractometer 0-32, 28-62 °Brix (Atago 2411 N-1, Japan)
- 2.12 เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส (pH meter) (Microcomputer pH-vision 6071, Jenco Electronics Limited, China)

3. สารเคมี

- 3.1 เกลือแกง (NaCl) (food grade) (ปทุมทิพย์, บริษัทอุตสาหกรรมเกลือบริสุทธิ์ จำกัด)
- 3.2 กรดซิตริก (citric acid anhydrous)(food grade) (ห้างหุ้นส่วนจำกัด แล๊ป วัลเลย์)
- 3.3 กรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid) (food grade) (ห้างหุ้นส่วนจำกัด แล๊ป วัลเลย์)
- 3.4 แคลเซียมคลอไรด์ (calcium chloride) (food grade) (ห้างหุ้นส่วนจำกัด แล๊ป วัลเลย์)
- 3.5 กลูโคส (glucose) (food grade) (ห้างหุ้นส่วนจำกัด แล๊ป วัลเลย์)
- 3.6 ฟรุคโตส (fructose) (food grade) (ห้างหุ้นส่วนจำกัด แล๊ป วัลเลย์)
- 3.7 ซูโครส (sucrose) (food grade) (บริษัทน้ำตาลมิตรผล จำกัด)
- 3.8 แคลเซียมคาร์ไบด์ (calcium carbide) (commercial grade) (บริษัทกรุงเทพคาร์ไบด์ อุตสาหกรรมจำกัด)

4. เครื่องมือที่ใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ผลทางสถิติ

- 4.1 คอมพิวเตอร์
- 4.2 โปรแกรมสำเร็จรูป

วิธีการ

1. ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

1.1 มะม่วงน้ำดอกไม้ (*Mangifera indica* Linn.) ได้ซื้อจากตลาดในกรุงเทพ ประเทศไทย มีนาคม-มิถุนายน 2552 ซึ่งมีอายุการเก็บเกี่ยวในช่วง 16 สัปดาห์ ปลูกในจังหวัดนครปฐม โดยคัดเลือกให้มีความสม่ำเสมอของสีและขนาด รวม 487 ผล ขนส่งไปยังห้องปฏิบัติการที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และเก็บไว้ในห้องปรับอากาศน้อยกว่า 8 ชั่วโมงก่อนการวิเคราะห์ต่อไป แต่ละการทดลอง ใช้มะม่วงอย่างน้อย 15 ผล การศึกษาทั้งหมดทำการทดลอง 3 ครั้ง ในการวัดแต่ละครั้งใช้ชิ้นตัวอย่างอย่างน้อย 20 ชิ้นในการวิเคราะห์

คัดเลือกมะม่วงน้ำดอกไม้ ให้มีขนาดสม่ำเสมอ โดยเลือกมะม่วงน้ำดอกไม้ขนาด 300-350 กรัมต่อผล และคัดเลือกความแก่ใกล้เคียงกันโดยใช้ความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะของมะม่วง

ที่แตกต่างกันในลักษณะของการจมและลอยในน้ำเกลือ ซึ่งมะม่วงที่เหมาะสมสำหรับการแช่เยือกแข็งคือมะม่วงที่มีความถ่วงจำเพาะ 1.01 – 1.03 ซึ่งจะเป็นมะม่วงที่จมในน้ำเกลือ 1 % และลอยในน้ำเกลือ 5 % ที่ 25 องศาเซลเซียส นำมาล้างและผึ่งให้แห้ง (ศุติพร, 2540)

2. การเปลี่ยนแปลงลักษณะของมะม่วงน้ำดอกไม้สุก

ทำการบ่มมะม่วงโดยใช้แคลเซียมคาร์ไบด์ ในอัตราส่วน 20 กรัม ต่อมะม่วง 1 กิโลกรัม ในตะกร้าพลาสติกที่ปิดทับด้วยกระดาษหนังสือพิมพ์ ที่อุณหภูมิห้อง (เจริญ, 2550) เป็นระยะเวลา 0 - 4 วัน นำมะม่วงที่ผ่านการบ่มมาล้างน้ำผึ่งให้แห้งและทำการวัดคุณภาพในด้านต่างๆ (สี, ปริมาณของแข็งทั้งหมด, พีเอช, ค่าความแน่นเนื้อ, และการทดสอบคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส) เพื่อคัดเลือกมะม่วงสำหรับการทำลองในขั้นต่อไป

3. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมมะม่วงที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งที่เหมาะสม

3.1 การเตรียมสารละลายผสมระหว่างน้ำมะม่วงกับน้ำตาล (สำหรับใช้ในขั้นตอนการอินฟิวชันและการแพรร่ธรรมชาติ)

นำมะม่วงที่สุกเต็มที่ (บ่มเป็นเวลา 4 วัน) ซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมด ~ 20 องศาบริกซ์ นำมาหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำไปปั่นด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้ (Moulinex, AY4671, China) ด้วยกำลังสูงสุดเป็นเวลา ~ 5 นาที หลังจากนั้นนำไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยง (Refrigerated centrifuge himac CR 20B2, Hitachi, Tokyo, Japan) ที่ความเร็วรอบ 10,000 รอบ/นาที, อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เพื่อแยกเอาสารละลายส่วนใสด้านบน หลังจากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที เพื่อทำลายเอนไซม์ ทำให้เย็นโดยทันทีแล้วนำไปเก็บไว้ในตู้แช่เย็นจนกว่าจะใช้

สารละลายผสมระหว่างน้ำมะม่วงและน้ำตาล เตรียมได้จากการนำน้ำมะม่วงที่เตรียมได้มาผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วนของน้ำมะม่วงต่อน้ำกลั่น 0:4, 1:3, 2:2, 3:1 และ 4:0 โดยมีปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำมะม่วง 0, 5, 10, 15 และ 20 องศาบริกซ์ ตามลำดับ หลังจากนั้นปรับความเข้มข้นของสารละลายให้เป็น 60 องศาบริกซ์ ด้วยน้ำตาล (ซูโครส:กลูโคส:ฟรุคโตส ในอัตรา 11:2:3.5 จากตารางที่ 1)

3.2 การเตรียมตัวอย่าง

ทำการคัดเลือกและบ่มมะม่วงตามข้อที่ 1 และ 2 เป็นระยะเวลา 2 วัน สำหรับมะม่วงสุกน้อย (สำหรับการอินฟิวชันและการแพร่แบบธรรมชาติ) และ 3 วัน สำหรับมะม่วงสุก (สำหรับการแช่เยือกแข็งมะม่วงสุก) นำมะม่วงที่ผ่านการบ่ม มาล้างน้ำ ปอกเปลือก ฝานเนื้อออกเป็นสองส่วน หั่นเป็นทรงสี่เหลี่ยม ขนาด $2 \times 2 \times 1.25$ เซนติเมตร³ แช่ในสารละลายผสมระหว่างกรดซิตริกที่ความเข้มข้น 0.5 % (w/v) และกรดแอสคอร์บิก ความเข้มข้น 0.25 % (w/v) เป็นเวลา 5 นาที ทิ้งให้สะเด็ดน้ำ นำชิ้นมะม่วงดังกล่าว มาแช่ในสารละลาย 1 % แคลเซียมคลอไรด์ เป็นเวลา 10 นาที ล้างน้ำสะอาด ทิ้งให้สะเด็ดน้ำ (ศุภพร, 2540)

3.3 เทคนิคการอินฟิวชัน และการแพร่ธรรมชาติ

เทคนิคการอินฟิวชัน และการแพร่ธรรมชาติทำที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ตัวอย่าง(จากข้อ 3.2) ประมาณ 500 กรัม แช่ลงไปในสารละลายสารละลายผสมระหว่างน้ำมะม่วงและน้ำตาล (จากข้อ 3.1) 500 กรัม นำไปใส่ในเครื่องอินฟิวชัน (ปริมาตรของเครื่อง 4 ลิตร) โดยใช้ความดันสุญญากาศที่ระดับ 74.66 kPa, 48.00 kPa และ 21.33 kPa โดยรักษาความดันไว้ที่ระยะเวลาที่ใช้ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที และปล่อยความดันเข้าสู่ความดันบรรยากาศเป็นเวลา 5 วินาที สำหรับเทคนิคการอินฟิวชัน ส่วนเทคนิคการแพร่แบบธรรมชาติจะทำการแช่ตัวอย่างที่ความดันบรรยากาศที่ระยะเวลา 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที เช่นเดียวกัน นำชิ้นมะม่วงขึ้นจากน้ำเชื่อม แล้วล้างโดยให้น้ำไหลผ่าน วางพักบนตะแกรงให้สะเด็ดน้ำและซับน้ำที่ผิวออก



ภาพที่ 6 แสดงลักษณะของเครื่องอินฟิวชัน

4. ศึกษากระบวนการแช่เยือกแข็ง

อุณหภูมิเริ่มต้นของตัวอย่าง $\sim 22 \pm 3$ องศาเซลเซียส แช่เยือกแข็งจนกระทั่งอุณหภูมิลบบริเวณจุดกึ่งกลางของชิ้นมะม่วงถึง -18 องศาเซลเซียส นำมาทำการละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 6 องศาเซลเซียส) เป็นเวลาข้ามคืน ก่อนจะนำไปทำการวิเคราะห์คุณภาพ

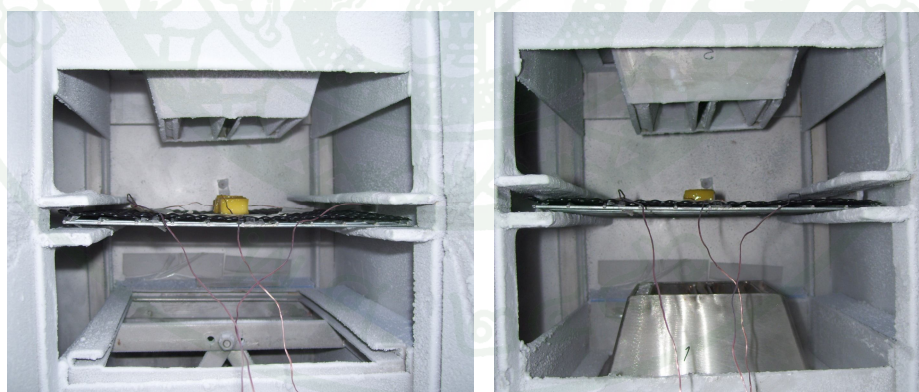
4.1 ทำการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบ Jet impingement โดยใช้สภาวะดังต่อไปนี้

- หัวเป่าลมบน : H/D เท่ากับ 5, 6, 7
: ความเร็วลมที่ปลายหัวเป่าลม 15, 25, 35 เมตรต่อวินาที
- หัวเป่าลมบน + หัวล่าง : H/D เท่ากับ 5, 6, 7
: ความเร็วลมที่ปลายหัวเป่าลม 10, 15, 20 เมตรต่อวินาที
- ที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส

โดย H คือ ระยะระหว่างปลายหัวเป่าลมกับผิวหน้าของผลิตภัณฑ์

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเป่าลม

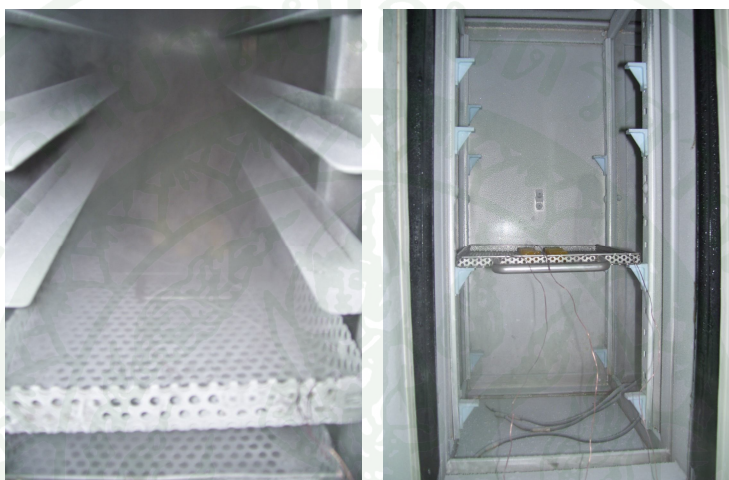
- มะม่วงวางตรงตำแหน่งหัวเป่าลม



ภาพที่ 7 แสดงลักษณะของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบ Jet impingement ซ้าย: หัวเป่าลมหัวบน, ขวา: หัวเป่าลมหัวบน + หัวล่าง

4.2 ทำการแช่เยือกแข็งโดยใช้เครื่องแช่เยือกแข็งแบบ Cryogenic ที่อุณหภูมิ – 80 องศาเซลเซียส

4.3 ทำการแช่เยือกแข็งโดยใช้เครื่องแช่เยือกแข็งแบบ Air-blast ที่อุณหภูมิ – 40 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 4 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 8 แสดงลักษณะของเครื่องแช่เยือกแข็ง ซ้าย: Cryogenic, ขวา: Air-blast

5. การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีและกายภาพ

5.1 ลักษณะเนื้อสัมผัส (ความแน่นเนื้อ)

โดยใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (TA.XT.Plus model, Stable Micro Systems Ltd, Godalming, UK) วัดแบบ compression โดยใช้หัวกดรูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มิลลิเมตร โดยกดลงไปในพื้นที่ตัวอย่างในระดับความลึกจากผิวหน้า 50 % ของความสูงของชิ้นตัวอย่าง โดยกำหนด pre-test, test and post-test speeds of 1.5, 0.5 and 10 mm/s ตามลำดับ ทำการวิเคราะห์ค่าแรงกดสูงสุด (Max. force) คำนวณหา % Force loss

$$\% \text{ Force loss} = \left(\frac{\text{Force before process} - \text{Force after process}}{\text{Force before process}} \right) \times 100$$

5.2 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในน้ำ (TSS)

ปั่นตัวอย่างให้ละเอียด และกรองด้วยผ้าขาวบาง วัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในน้ำ (° Brix) ด้วย Hand Refractometer (Atago 2411 N-1, Japan).

5.3 ค่าความเป็นกรด-เบส (pH)

ปั่นตัวอย่างให้ละเอียด และกรองด้วยผ้าขาวบาง วัดค่าพีเอชโดยเครื่อง pH meter (Microcomputer pH-vision 6071, Jenco Electronics Limited, China)

5.3 การวัดค่าสี

ค่าสีด้วยเครื่องวัดสี Miniscan XE (Hunter Lab Reston, Virginia, USA) ในระบบ CIE ค่าความสว่าง (L^*), ค่าความเป็นสีแดง-เขียว (a^*), ความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b^*)

5.4 ค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังการละลาย (Drip loss) (ดัดแปลงมาจาก Yuenyongputtakal, 2006)

นำตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งมาทำการละลายที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 6 องศาเซลเซียส) เป็นเวลาข้ามคืนในภาชนะปิด หลังจากนั้นนำมาวางบนกระดาษกรองเพื่อซับน้ำเป็นเวลา 15 นาที แล้วทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่าง

$$\% \text{ Drip loss} = (W_{bf} - W_{af}) / W_{bf} \times 100$$

โดย W_{bf} คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนการแช่เยือกแข็ง

W_{af} คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังการทำละลาย

5.5 ประเมินการยอมรับทางประสาทสัมผัส

โดยทดสอบความชอบด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม โดยใช้จำนวนผู้ทดสอบ 20 คน ด้วยวิธี 9-point hedonic scaling test ความชอบ (1 = ไม่ชอบมากที่สุด,

2 = ไม่ชอบมาก, 3 = ไม่ชอบปานกลาง, 4 = ไม่ชอบเล็กน้อย, 5 = เฉยๆ, 6 = ชอบเล็กน้อย, 7 = ชอบเล็กน้อย, 8 = ชอบมาก และ 9 = ชอบมากที่สุด (Russell and John, 1987).

5.6 คำนวณหาอัตราการเยือกแข็งจาก

$$5.6.1 \text{ อัตราการแช่เยือกแข็ง } (^{\circ}\text{C} / \text{min}) = \frac{\text{อุณหภูมิเริ่มต้น } (^{\circ}\text{C}) - (-18 ^{\circ}\text{C})}{\text{เวลาเริ่มต้นจนถึงเวลาที่อุณหภูมิ } -18 ^{\circ}\text{C} (\text{min})}$$

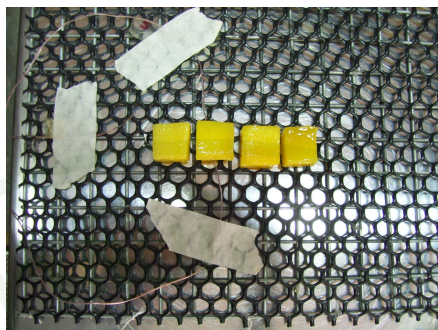
$$5.6.2 \text{ อัตราการแช่เยือกแข็ง } (^{\circ}\text{C} / \text{min}) = \frac{\text{อุณหภูมิจุดเยือกแข็งแรกของมะม่วง } (^{\circ}\text{C}) - \text{อุณหภูมิที่เกิดปริมาณน้ำแข็งในมะม่วง 80\% } (^{\circ}\text{C})}{\text{เวลาอุณหภูมิจุดเยือกแข็งแรกของมะม่วง} - \text{เวลาอุณหภูมิที่เกิดปริมาณน้ำแข็งในมะม่วง 80\% (min)}}$$

โดย อุณหภูมิจุดเยือกแข็งแรกของมะม่วงและอุณหภูมิที่เกิดปริมาณน้ำแข็งในมะม่วง 80% ได้จากการคำนวณจากปริมาณองค์ประกอบภายในเนื้อมะม่วง

ตารางที่ 4 แสดงอุณหภูมิจุดเยือกแข็งแรก (T_{if}) และอุณหภูมิที่เกิดปริมาณน้ำแข็งในมะม่วง 80% ($T_{80\% \text{ ice}}$) ที่ปริมาณน้ำตาลแตกต่างกัน (วิธีการคำนวณดังแสดงในภาคผนวก ข)

ปริมาณน้ำตาล ($^{\circ}\text{Brix}$)	T_{if} ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{80\% \text{ ice}}$ ($^{\circ}\text{C}$)
11.0	-1.17	-7.0
11.5	-1.21	-7.1
11.9	-1.25	-7.7
12.8	-1.34	-7.9
13.5	-1.40	-8.4
17.0	-1.74	-10.8
18.1	-1.84	-11.7
21.5	-2.18	-14.7

5.7 การวัดอุณหภูมิ



ภาพที่ 9 แสดงการวัดอุณหภูมิที่บริเวณต่างๆ

ใช้ Thermocouple type T (Thermocouple Wire - T Type, Duplex Insulated, Omega engineering, INC, USA) 3 อัน โดยอันที่ 1 ทำการวัดอุณหภูมิที่บริเวณใจกลางของชิ้นอาหาร อันที่ 2 บริเวณผิวอาหารในชิ้นเดียวกัน และอันที่ 3 ทำการวัดอุณหภูมิภายในห้องแช่เยือกแข็งแล้วทำการต่อเข้ากับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Prescica 2002, USA)

5.8 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

โดยการวางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ Randomized Complete Block Design (RCBD) การจัดการทดลองแบบ factorial 3x3 in RCBD และวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS® (SPSS, Illinois, USA)

7. สถานที่ทำการวิจัย

ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

8. ระยะเวลาที่ทำการวิจัย

การทดลองครั้งนี้เริ่มตั้งแต่เดือน มิถุนายน 2551 ถึง มิถุนายน 2552

ผลและวิจารณ์

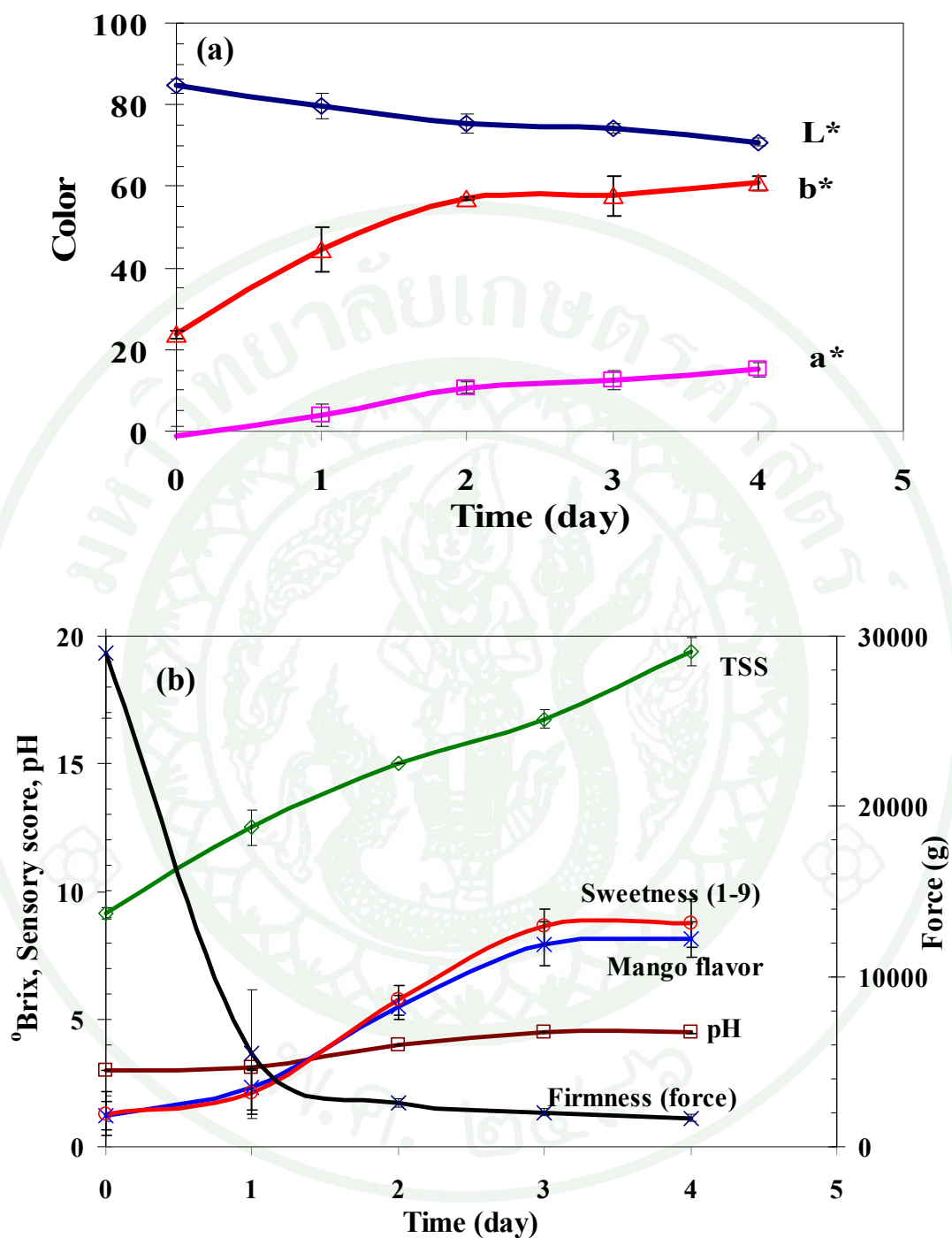
1. สถานะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมมะม่วงก่อนการแช่เยือกแข็ง

ลักษณะปรากฏของมะม่วงจะมีการเปลี่ยนแปลงไปที่ละน้อยในระหว่างการบ่มดังแสดงใน ภาพที่ 10 โดยเริ่มต้นการบ่มที่ 0 วัน ซึ่งมะม่วงเริ่มต้นยังคงดิบอยู่ สีผิวจะมีสีเขียวเข้ม และสีเนื้อจะมี สีขาวอมเขียวอ่อนๆ เมื่อระยะเวลาการบ่มนานขึ้นสีเขียวของทั้งสองส่วนจะค่อยๆ จางลง ขณะที่สี เหลืองจะเริ่มปรากฏขึ้นมา สีเนื้อจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองออกส้ม (เป็นลักษณะของการสุกเต็มที่) ผล จะเริ่มปรากฏลักษณะเป็นจุดดำๆ ที่ผิว ซึ่งเป็นลักษณะที่บ่งบอกถึงการเสื่อมเสียโดยเฉพาะส่วนหัว ของผล (เมื่อทำการบ่มไปเป็นเวลา 4 วัน)

การเปลี่ยนแปลงลักษณะของเนื้อมะม่วง ดังแสดงใน ภาพที่ 11 ซึ่งสังเกตได้ว่าการ เปลี่ยนแปลงค่า L^* , a^* และ b^* (ภาพที่ 11a) จะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงที่มองเห็นได้ (ภาพที่ 10) เมื่อเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นสีเนื้อจะพัฒนาจากสีขาวอมเขียวอ่อนๆ ไปเป็นสีเหลืองออกส้ม ดังค่า L^* ที่ลดลงจาก 85 (สว่าง) ไปเป็น 71 (เข้มขึ้น), a^* และ b^* มีค่าเพิ่มขึ้นจาก -1 (สีเขียว) ไปเป็น 14 (สีแดง) และ 24 (สีเหลืองอ่อน) ไปเป็น 61 (สีเหลืองเข้ม) ตามลำดับ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงลักษณะ ปรากฏดังกล่าว จากสีเขียวเป็นสีเหลืองส้ม สามารถอธิบายได้ว่าเป็นการสลายของคลอโรฟิลล์ (chlorophyll) ซึ่งมีสีเขียว ทำให้คาร์โรทีนอยด์ (carotenoids) ซึ่งมีสีเหลืองที่มีอยู่ในมะม่วงปรากฏ ให้เห็นเด่นชัดขึ้นมา (ธีราพร, 2536) ผลไม้หลายชนิดจะมีการสะสมคาร์โรทีนอยด์ขณะที่ผลมีอายุ มากขึ้นหรือสุก สำหรับมะม่วงเมื่อสุกจะมีสีเหลืองซึ่งเป็นสีที่เนื่องมาจากรงควัตถุคาร์โรทีนอยด์ คาร์โรทีนอยด์ในมะม่วงส่วนใหญ่จะเป็น เบต้า-แคโรทีน และจะเพิ่มขึ้นเมื่อสุกเพิ่มขึ้น (ศุภิพร, 2540)



ภาพที่ 10 ลักษณะของมะม่วงที่ผ่านการบ่มด้วยแคลเซียมคาร์ไบด์ เป็นเวลา 0 - 4 วัน



ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงของลักษณะเนื้อมะม่วงระหว่างระยะเวลาการบ่ม (a) สี (L^* , a^* และ b^*) และ (b) TSS, คะแนนความชอบ (รสหวานและกลิ่นรสมะม่วง), พีเอช และความแน่นเนื้อ (แรงกด, หน่วย g)

มะม่วงเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นจะมีรสหวานเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 11b) โดยจะเป็นลักษณะการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตาลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงแป้งที่สะสมในเนื้อมะม่วงระหว่างการเจริญเติบโตซึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาล ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นในผลไม้ประเภทโคลเมคเทอร์ริก (ธีระ, 2545; Subedi *et al.*, 2007) โดยปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) มีการเพิ่มขึ้นในลักษณะที่เป็นเส้นตรงจาก 9.1 (มะม่วงดิบ, 0 วัน) ไปเป็น 19.4 (มะม่วงสุกเต็มที่, 4 วัน) ซึ่งเคยมีการรายงานว่ามะม่วงน้ำดอกไม้เมื่อสุกเต็มที่จะมีปริมาณของแข็งทั้งหมด 19 ถึง 21% (ดวงตรา, 2526) ในการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัสการเพิ่มขึ้นของรสหวานสามารถเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจนโดยที่ 2 วัน มีคะแนนความชอบเฉลี่ยสูงขึ้นจาก 1.3 (1 วัน) เป็น ~5.7 (2 วัน) ส่วนวันที่ 3 และ 4 วัน รสหวานเป็นที่พึงพอใจของผู้ทดสอบ โดยมีคะแนนความชอบที่สูงถึง 8.6 และ 8.8 ตามลำดับ

ค่า พีเอชเพิ่มขึ้นจาก 3.0 เป็น 4.5 ซึ่งบ่งบอกถึงการลดลงของความเปรี้ยว กรดที่เป็นตัวหลักในมะม่วงน้ำดอกไม้ ประกอบไปด้วยกรดซิตริก กรดซิตริก และกรดมาลิก (ดวงตรา, 2526; ธีระ, 2545; Selvaraj *et al.*, 1989) การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดในผลไม้พบโดยทั่วไปในระหว่างกระบวนการสุก ส่งผลให้เกิดการลดลงของความเปรี้ยว (ดวงตรา, 2526; Selvaraj *et al.*, 1989)

การยอมรับในด้านของกลิ่นรส มีลักษณะเช่นเดียวกับความหวาน กลิ่นรสมีการพัฒนาสะสมเพิ่มขึ้นในวันที่ 2 (คะแนน = 5.5) และ 3 (คะแนน = 8.0) และดูเหมือนว่าจะเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 4 (คะแนน = 8.1) จะเห็นได้ว่ามะม่วงบ่ม 4 วันมีความเข้มข้นของรสชาติมะม่วงเต็มที่ (เช่น butyric acid, β -pinene, 3-carene และ β -phellandrene) ในสัดส่วนที่พอเหมาะ และยังมีความหวานที่ต้องการตามที่อธิบายข้างต้น ดังนั้นมะม่วงบ่ม 4 วัน จึงถูกเลือกสำหรับเตรียมเป็นน้ำมะม่วงสำหรับกระบวนการอินฟิวชัน

เนื้อผลไม้จะนิ่มลงอย่างมากหลังจากบ่มไป 1 วัน แรงกดสูงสุดลดลงจาก 29,000 ถึง 5,500 กรัม ในวันที่ 2 เนื้อเยื่อมะม่วงจะนิ่มลงเล็กน้อย (แรงกด = 2,600 กรัม) จากวันที่ 1 หลังจากนั้นเนื้อจะมีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก (แรงกด = 2,000 และ 1,700 กรัม ในวันที่ 3 และ 4 ตามลำดับ) การนิ่มของเนื้อมะม่วงและผลไม้อื่นๆ เกิดจากปฏิกิริยาของเอนไซม์ในการเปลี่ยนโปรโตเพกตินไปเป็นเพกตินที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ (สุลีส, 2540; Roe and Bruemmer, 1981) ในงานวิจัยนี้พบว่าปฏิกิริยาของเอนไซม์นี้มีประสิทธิภาพสูงมากในช่วงแรกของการบ่ม (วันที่ 0 – 1)

การพิจารณาคัดเลือกกระดับการสุกที่เหมาะสมสำหรับการแช่เยือกแข็ง ลักษณะเนื้อของมะม่วงเป็นสิ่งสำคัญจากผลการค้นพบข้างต้นนี้ พบว่าการเสื่อมลงของโครงสร้างมะม่วงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วใน 1 วัน ของการบ่ม ในขณะที่ สี กลิ่นรส ยังไม่พัฒนาจนเป็นที่พึงพอใจ แต่ในวันที่ 2 ยังแข็งเท่ากับมะม่วงบ่ม 1 วัน โดยมีกลิ่น รส ดีขึ้นมาก ดังนั้น จึงเลือกมะม่วงบ่ม 2 วัน นี้ ในการทำการวิจัยแช่เยือกแข็งต่อไป ได้มีรายงานแนะนำให้ใช้มะม่วงที่มีความสุกที่ใกล้เคียงกับมะม่วงสุกเต็มที่ (เช่น มะม่วงบ่ม 3 วัน) สำหรับการแช่เยือกแข็ง (ศุทธิพร, 2540; Luanda *et al.*, 2009) โดยในการเลือกจะพิจารณาการยอมรับในด้านกลิ่นรสของมะม่วงเป็นหลักไม่ใช่อัตราส่วนของมะม่วง ในการวิจัยนี้ ได้ทำการเลือกมะม่วงที่ทำการบ่มเป็นเวลา 2 วัน (มะม่วงสุกน้อย) มะม่วงในขั้นนี้มีโครงสร้างเนื้อเยื่อที่แข็งแรงกว่ามะม่วงที่ผ่านการบ่ม 3 วัน ซึ่งการเกิดผลึกน้ำแข็งในโครงสร้างเนื้อเยื่อของมะม่วงที่ผ่านการบ่ม 2 วัน น่าจะถูกทำลายน้อยกว่าโครงสร้างเนื้อเยื่อของมะม่วงมีความสุกที่มากกว่า (เช่น บ่มเป็นเวลา 3 วัน) ส่วนในด้านของปัญหาการมีกลิ่นรสมะม่วงสุกและการพัฒนาของรสหวานที่ค่อนข้างต่ำนั้นสามารถแก้ปัญหาโดยการเติมน้ำมะม่วงสุกเต็มที่และน้ำตาลผสมเพิ่มเข้าไปในเนื้อเยื่อของมะม่วงบ่ม 2 วัน ได้

2. การปรับปรุงคุณภาพของมะม่วงสุกน้อยด้วยน้ำมะม่วงและน้ำตาลในเนื้อเยื่อมะม่วง

น้ำมะม่วงและน้ำตาลถูกเติมลงในมะม่วงสุกน้อย (Partially ripe : PR) บ่ม 2 วัน) ด้วยเทคนิคการอินฟิวชัน (VI) และการแพร่แบบธรรมชาติ (NMD) เพื่อเพิ่มกลิ่นรสมะม่วงสุกและความหวาน โดยมีจุดมุ่งหมายให้มะม่วงสุกน้อย (PR) มีคุณภาพเหมือนหรือใกล้เคียงกับมะม่วงสุกเต็มที่ (Fully Ripe : R) บ่ม 4 วัน) (ภาพที่ 11)

2.1 ผลของเวลาที่ใช้ในการแช่

ด้วยวิธีการของ NMD สารละลายน้ำตาล 60 องศาบริกซ์ (ซูโครส:กลูโคส:ฟรุกโตส = 11:2:3.5) ได้มีการแพร่เข้าไปในเนื้อของมะม่วงสุกน้อยเมื่อเวลาผ่านไป มีการเปลี่ยนแปลงของลักษณะของมะม่วงดังแสดงใน ภาพที่ 12 โดยพบว่าค่า TSS ของมะม่วงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจาก 13.6 ถึง 19.7 องศาบริกซ์ ขณะที่เนื้อสัมผัสกลับค่อยเสื่อมลงโดยแรงกดสูงสุดที่วัดได้ลดลงจาก 2,592 ถึง 2,175 กรัม ภายในเวลาการแช่ 1 ชั่วโมง (ภาพที่ 12b)

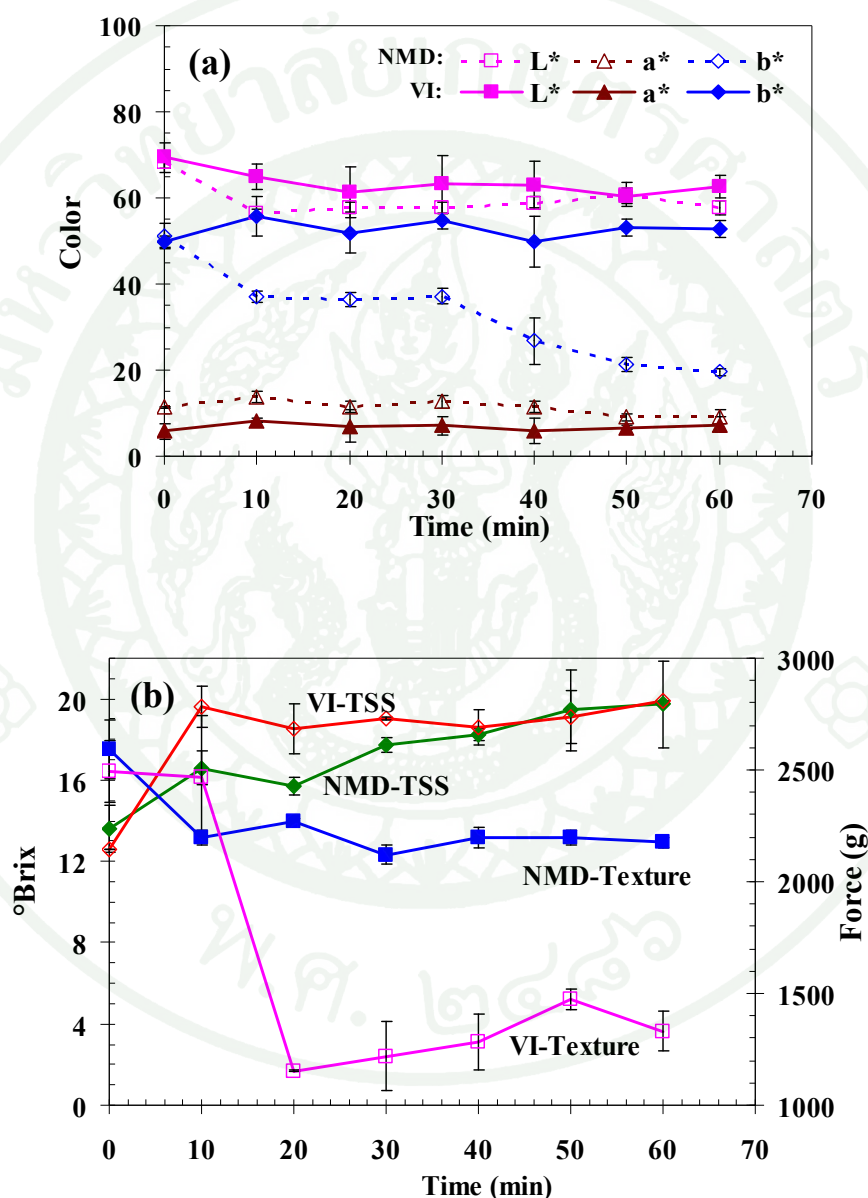
ในทางกลับกัน วิธี VI ช่วยในการบังคับสารละลายน้ำตาลให้เข้าสู่เนื้อเยื่อของมะม่วง ที่สภาวะสุญญากาศ 21.33 kPa ค่า TSS เพิ่มขึ้นถึง 19.6 องศาบริกซ์ ในเวลา 10 นาที (ภาพที่ 12b) อย่างไรก็ตาม TSS ไม่มีการเพิ่มขึ้นหลังจากนี้ (เวลา ≥ 10 นาที) เมื่อพิจารณาถึงเนื้อเยื่อ ค่าแรงกด ยังคงรักษาไว้เช่นเดิมภายในการอินฟิวชันเป็นเวลา 10 นาที (แรงกด $\sim 2,500$ กรัม) ที่การอินฟิวชัน เป็นเวลา 20 นาที เนื้อเยื่อก่อนข้างนี้ลดลงเป็นอย่างมาก (แรงกด $\sim 1,100$ กรัม) ซึ่งการลดลงของ เนื้อเยื่อมะม่วงอาจเกิดเนื่องจากโครงสร้างเนื้อเยื่อถูกทำลายจากการผ่านเข้า/ออกของของไหล ระหว่างในและนอกเซลล์ของมะม่วงผ่านเซลล์เมมเบรน/เยื่อหุ้มเซลล์ในช่วงสุญญากาศ/ที่มีแรงดัน (Fito *et al.*, 2000; Zhao, 2004) อย่างไรก็ตาม หลังจาก 20 นาที เนื้อเยื่อมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเพียง เล็กน้อยเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของ TSS หรือปริมาณน้ำตาลใน เนื้อเยื่อของมะม่วง ซึ่งบ่งบอกได้ว่าความแข็งแรงของเนื้อเยื่อที่เพิ่มขึ้นอาจสัมพันธ์กับปริมาณ น้ำตาลที่สูงขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวถูกสนับสนุนจากการค้นคว้าที่พบว่าน้ำตาลมีประโยชน์ ช่วยในการปรับปรุงความสมบูรณ์ของโครงสร้างของผลไม้ (Chiralt *et al.*, 2001)

สังเกตได้ว่า VI ไม่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสีของมะม่วงมากนัก (ภาพที่ 12a) ค่า L^* , a^* และ b^* ส่วนใหญ่จะมีค่าที่เกือบคงที่ 64, 8 และ 53 ตามลำดับ ซึ่งถือเป็นสัญญาณที่ดี โดยทั่วไป VI อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีอย่างชัดเจนในผลไม้ (Torreggiani *et al.*, 1987; Erba *et al.*, 1994) และที่น่าสนใจ คือ ค่า L^* , a^* และ b^* มีค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับมะม่วงสุกเต็มที่ ที่ (65, 15 และ 56, ตามลำดับ) โดยมีค่าแตกต่างของค่า a^* และ b^* เพียงเล็กน้อย โดยจะสังเกตว่า มะม่วง VI จะมีสีส้ม/เหลืองที่ค่อนข้างน้อย

ในทางตรงกันข้าม NMD ทำให้ค่า b^* ลดลงค่อนข้างมากเมื่อเวลาผ่านไป แต่มีผล เล็กน้อยกับค่า L^* และ a^* ค่า b^* ลดลงจาก 51.1 ถึง 19.6 ในเวลาหนึ่งชั่วโมง ค่า b^* ที่ลดลงนี้แสดง ให้เห็นว่าความเข้มข้นของสีเหลืองลดน้อยลง และมีความเป็นสีน้ำเงินเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะที่ ไม่เป็นที่ยอมรับ การเปลี่ยนแปลงสีของผลไม้ในกระบวนการ NMD ได้มีการรายงานไว้โดยทั่วไป (Torreggiani, 1993; Dalla, 2001) ซึ่งถือเป็นอุปสรรคในการนำเทคนิคนี้มาประยุกต์ใช้กับผลไม้

จากผลข้างต้นจะเห็นได้ว่าเวลาที่เหมาะสมของการใช้เทคนิค VI ที่ความดัน 21.33 kPa คือ ประมาณ 10 นาที ที่เวลาดังกล่าว เนื้อสัมผัสของมะม่วง (แรงกด $\sim 2,500$ กรัม) มีความเสียหาย น้อยและยังคงมีความแน่นเนื้อมากกว่าที่บ่ม 3 และ 4 วัน (2,000 และ 1,700 ตามลำดับ) นอกจากนี้ TSS (19.6 องศาบริกซ์) ได้ถูกปรับให้มีระดับที่ใกล้เคียงกับมะม่วงสุกเต็มที่ (20.0 องศาบริกซ์) สี

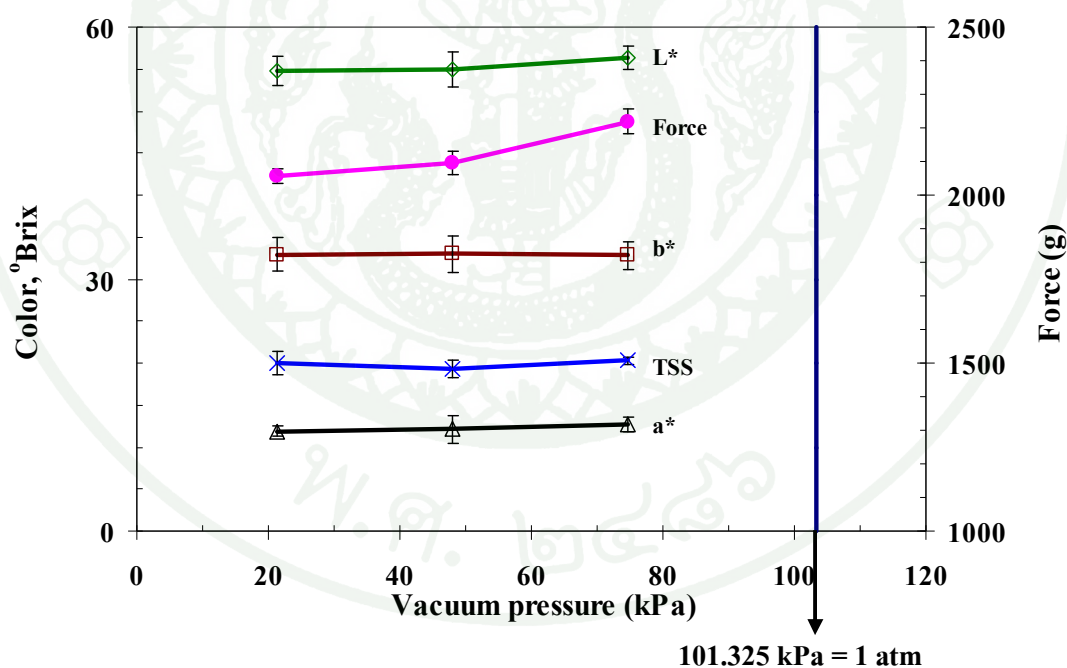
ของมะม่วงดังกล่าวค่อนข้างมีความใกล้เคียงกับมะม่วงสุกเต็มที่ เป็นที่น่าสนใจว่ามีการศึกษาพบว่าเทคนิคอินฟิวชันที่ใช้กับผลไม้พวกมะม่วง แอปเปิ้ล มะละกอ ถั่วฝักยาว พืช เมลอน และมาเมย์ ใช้เวลาในการอินฟิวชันอยู่ในช่วง 3 ถึง 45 นาที (Fito, 1994; Mújica-Paz *et al.*, 2003a) ซึ่งเป็นช่วงเวลาเดียวกับผลในงานวิจัยนี้



ภาพที่ 12 ผลของวิธีการเติมสารเข้าไปในเนื้อมะม่วง, NMD (ความดันบรรยากาศ) และ VI (21.33 kPa) สำหรับมะม่วงสุกน้อยที่แช่ในสารละลายน้ำตาลที่ช่วงเวลาต่างๆ โดยแสดงลักษณะ ต่าง ๆ ประกอบด้วย (a) color และ (b) TSS และ Force

2.2 ผลของความดันสุญญากาศ (VI)

ระดับของความดันสุญญากาศ (ในระยะเวลา 10 นาที) มีผลกระทบอย่างมากต่อเนื้อสัมผัสซึ่งมากกว่าสี และ TSS ดังภาพที่ 13 แรงกดสูงสุดลดลงเมื่อความดันลดลง (ความเป็นสุญญากาศเพิ่มขึ้น) จาก 74.66, 48.00, 21.33 kPa ตามลำดับ ค่าแรงกดที่วัดได้คือ 2,219, 2,095 และ 2,056 กรัม ตามลำดับ แต่ค่า L^* , a^* , b^* และ TSS มีค่าค่อนข้างคงที่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของความดันสุญญากาศไม่ได้ช่วยในการเพิ่มของ TSS และไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีแต่กลับเพิ่มการถูกทำลายของเนื้อเยื่อ (นิ่มมากขึ้น) ดังนั้น การประยุกต์ใช้ระดับความดันสุญญากาศที่ 74.66 kPa เป็นเวลา 10 นาที จึงดีกว่าในการนำมาใช้ในการเพิ่มสารละลายน้ำตาลเข้าไปในมะม่วงสุกน้อยที่น่าสนใจคือระดับความดันสุญญากาศนี้อยู่ในช่วงเดียวกับที่แนะนำ สำหรับผลไม้หลายชนิด เช่น มะม่วง เมล่อน มามะยม แอปเปิ้ล มะละกอ และ พีช (13.60 ถึง 67.46 kPa) (Mújica-Paz *et al.*, 2003b; Pretel *et al.*, 2007)



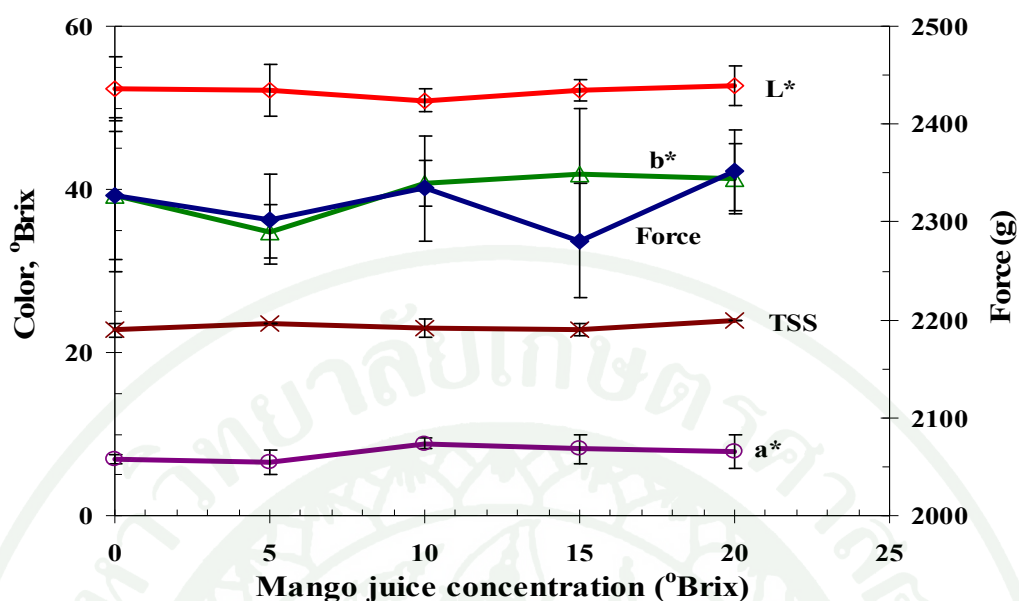
ภาพที่ 13 ผลของความดันสุญญากาศต่อลักษณะของมะม่วงสุกน้อยที่ถูกแช่ในสารละลายน้ำตาลเป็นเวลา 10 นาที โดยลักษณะต่างๆ ประกอบด้วย TSS, สี และความแน่นเนื้อ

2.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายน้ำมะม่วงและน้ำตาล

วัตถุประสงค์หลักของการประยุกต์ใช้น้ำมะม่วงและน้ำตาลเพื่อปรับปรุงคุณภาพของมะม่วงสุกน้อยในแง่ของกลิ่นมะม่วงสุก และรสชาติ (รสหวานของมะม่วง) และสี ในขณะที่เนื้อสัมผัสยังคงมีความแข็งแรงอยู่ มะม่วงสุกน้อยได้ถูกนำมาอินฟิวด้วยสารละลายผสมระหว่างน้ำมะม่วงและน้ำตาลที่ 74.66 kPa เป็นเวลา 10 นาที ผลของความเข้มข้นของน้ำมะม่วงดังแสดงในภาพที่ 14 ปรากฏว่าความเข้มข้นของน้ำมะม่วงที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า L^* และ a^* (~52 และ ~7.7 ตามลำดับ) ส่วนค่า b^* นั้นดูเหมือนว่าจะมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (ภาพที่ 11a) ซึ่งบ่งบอกได้ว่ารงควัตถุสีเหลือง เช่น แคโรทีนอยด์ (ธีราพร, 2536) ในน้ำมะม่วงน่าจะสามารถอินฟิวเข้าสู่โครงสร้างเนื้อเยื่อของมะม่วงสุกน้อย ที่ความเข้มข้นของน้ำมะม่วงสูงนำไปสู่การเข้าไปของรงควัตถุในเนื้อเยื่อที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของการเปลี่ยนแปลงของสีพบว่ามีความลดลง (ภาพที่ 14b) ซึ่งอาจเนื่องจากความจริงที่ว่าประสาทสัมผัสของผู้ทดสอบไม่ต้องการลักษณะของสีเหลืองแบบที่ไม่คุ้นเคยว่าเป็นของมะม่วงตามธรรมชาติ

ค่า TSS มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของน้ำมะม่วง ในการตอบสนองต่อการทดสอบทางประสาทสัมผัส คะแนนการยอมรับของมะม่วงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน จะเห็นได้ว่ากลิ่นมะม่วงสุกที่ต้องการซึ่งเป็นสารโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น butyric acid, β -pinene, 3-carene และ β -phellandrene สามารถแพร่เข้าไปภายในเนื้อเยื่อของมะม่วงได้ ซึ่งสามารถเข้าไปได้มากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำมะม่วงสูงขึ้น (สุลิพร, 2540; ธีระ, 2545)

คะแนนการยอมรับในด้านเนื้อสัมผัสมีความแตกต่างเล็กน้อยเมื่อความเข้มข้นของน้ำมะม่วงมากขึ้น โดยเนื้อสัมผัสมีความเสียหายที่รุนแรงมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำมะม่วงเพิ่มขึ้น คะแนนการยอมรับในด้านเนื้อสัมผัสได้ลดลงจาก 6.8 ถึง 6 เมื่อความเข้มข้นของน้ำมะม่วงเปลี่ยนจาก 0 เป็น 20 องศาบริกซ์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำมะม่วง จะทำให้สารละลายมีความหนืดสูงขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นเพราะมีสารโมเลกุลใหญ่มากขึ้น ซึ่งส่งผลทำลายเนื้อสัมผัสมะม่วงมากขึ้น ในขณะที่โมเลกุลเหล่านี้ผ่านเข้า/ออกเซลล์มะม่วง



ภาพที่ 14 ผลของความเข้มข้นของน้ำมะม่วงต่อลักษณะของมะม่วงสุกน้อยหลังการอินฟิวชัน, การแช่เยือกแข็งและการทำละลาย (a) ค่าสี (L*, a* and b*), TSS และเนื้อสัมผัส (force)

ตารางที่ 5 ผลของการประเมินทางด้านประสาทสัมผัสของมะม่วงที่ผ่านเทคนิคการอินฟิวชัน ภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ความดัน 74.66 kPa เวลา 10 นาทีที่ความเข้มข้นของน้ำมะม่วงต่างๆ

Sensory	FR ^{ns}	PR	0 °Brix	5 °Brix	10 °Brix	15 °Brix	20 °Brix
Color	8.8 ± 0.5	8.0 ^b ± 0.7	7.1 ^c ± 0.8	6.9 ^c ± 0.9	6.0 ^d ± 1.0	5.4 ^d ± 1.2	4.5 ^e ± 0.5
Odor	8.3 ± 0.6	5.4 ^d ± 1.2	6.1 ^c ± 1.3	7.2 ^b ± 0.8	7.0 ^{bc} ± 0.8	7.7 ^{ab} ± 0.7	7.9 ^a ± 1.0
Taste	8.5 ± 0.7	3.6 ^d ± 0.9	6.5 ^c ± 1.3	7.9 ^a ± 0.9	7.7 ^a ± 0.9	6.9 ^b ± 0.6	6.7 ^c ± 1.0
Texture	8.4 ± 0.6	7.8 ^a ± 0.7	6.8 ^{bc} ± 1.1	7.0 ^b ± 0.9	6.1 ^c ± 0.7	6.5 ^{bc} ± 1.0	6.0 ^c ± 1.0
Overall	8.8 ± 0.6	4.3 ^d ± 0.5	6.3 ^{bc} ± 1.1	7.0 ^b ± 0.7	6.9 ^b ± 0.9	6.8 ^b ± 1.2	5.9 ^c ± 1.3

หมายเหตุ VI คือ Partially Ripe + Infusion, FR คือ Fully ripe,

^{ns} คือค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ผลรวมของการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส ดังแสดงใน ตารางที่ 5 เห็นได้ชัดว่า สารละลายผสมระหว่างน้ำมะม่วงและน้ำตาล ในทุกๆความเข้มข้นของน้ำมะม่วงสามารถช่วย ปรับปรุงกลิ่นรสของมะม่วงสุกบางส่วนได้ คุณลักษณะทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นยกเว้น ค่าสี และเนื้อ สัมผัส การลดลงของค่าการทดสอบทางประสาทสัมผัสของเนื้อเยื่ออาจเนื่องมาจากการถูกทำลาย ของเนื้อเยื่อที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอินฟิวชัน (ค่าแรงกดสำหรับตัวอย่างที่ผ่านการอินฟิว ชันและไม่อินฟิวชัน คือ 2,600 และ 2,300 กรัม ตามลำดับ) การเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อระดับนี้ สามารถรู้สึกรู้ได้ และตอบสนองออกมาในลักษณะที่ไม่ชอบ จึงส่งผลให้คะแนนการยอมรับทางด้าน เนื้อสัมผัสลดลง สำหรับในด้านสีตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น สีเหลืองแบบใหม่ที่เกิดขึ้นเป็นสีเหลือง ที่ผู้บริโภคไม่มีความคุ้นเคย ส่งผลให้คะแนนการยอมรับด้านสีลดลงเช่นกัน อย่างไรก็ตามกลิ่นรส และการยอมรับโดยรวมยังคงมีค่อนข้างสูง ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสสามารถบ่งชี้ได้ว่า สารละลายผสมระหว่าง น้ำมะม่วง 5 องศาบริกซ์ ช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของมะม่วงสุกน้อยได้ สูงสุด ที่สภาวะดังที่ได้แนะนำไว้แล้ว เมื่อทำการเปรียบเทียบกับมะม่วงสุก (3 วัน) มะม่วงที่ผ่านการ อินฟิวชันยังคงมีคุณภาพที่ดีกว่าเล็กน้อยในด้านคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสในด้านกลิ่น และรสที่ได้ค่าต่ำกว่าเล็กน้อย แต่มีคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสดีกว่า

มะม่วงสุกน้อยที่ถูกอินฟิวด้วยสารละลายผสมระหว่างน้ำมะม่วง 5 องศาบริกซ์ และ น้ำตาล เมื่อนำมาทำการเปรียบเทียบกับมะม่วงสุกในด้านการต้านทานความเสียหายของเนื้อเยื่อจาก การแช่เยือกแข็งและการทำลาย ผลการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส ดังแสดงในตารางที่ 6 น่าสนใจคือเห็นได้ชัดว่ามะม่วงสุกน้อยที่ผ่านการอินฟิวชันมีคะแนนการยอมรับโดยรวม (7.2) ที่มี ค่าสูงกว่ามะม่วงสุกที่ไม่ได้ผ่านการอินฟิวชัน (6.6) เนื่องจากการมีลักษณะของสีและเนื้อสัมผัสที่ ดีกว่า (คะแนนการยอมรับด้านสีและเนื้อสัมผัสที่สูงกว่า) กลิ่นและรสที่ได้มีความใกล้เคียงเป็นอย่างมาก กับมะม่วงสุกที่ไม่ได้ผ่านการอินฟิวชัน (คะแนนการยอมรับด้านกลิ่น รสที่ใกล้เคียงกัน) จึง สามารถกล่าวได้ว่ามะม่วงสุกน้อยที่ผ่านการอินฟิวชันภายใต้สุญญากาศด้วยสารละลายผสมระหว่าง น้ำมะม่วง 5 องศาบริกซ์และน้ำตาล มีความเหมาะสมสำหรับการแช่เยือกแข็งมากกว่ามะม่วงสุก

ตารางที่ 6 ผลของการประเมินทางด้านประสาทสัมผัสของมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและการทำละลาย

Sensory	FR	VI,Fz	FR,Fz
Color	8.8 ^a ± 0.5	7.4 ^b ± 0.6	6.9 ^c ± 0.8
Odor	8.3 ^a ± 0.6	7.5 ^b ± 0.4	7.6 ^b ± 0.6
Taste	8.5 ^a ± 0.7	6.9 ^b ± 0.6	7.1 ^b ± 0.9
Texture	8.4 ^a ± 0.6	8.1 ^a ± 0.3	7.2 ^b ± 1.0
Overall	8.8 ^a ± 0.6	7.2 ^b ± 0.5	6.6 ^c ± 0.5

หมายเหตุ VI คือ Partially Ripe + Infusion, FR คือ Fully ripe, Fz คือ Freezing

^{ns} คือค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

2.4 ผลของกระบวนการเตรียมและการแช่เยือกแข็งต่อลักษณะของมะม่วงแช่เยือกแข็ง

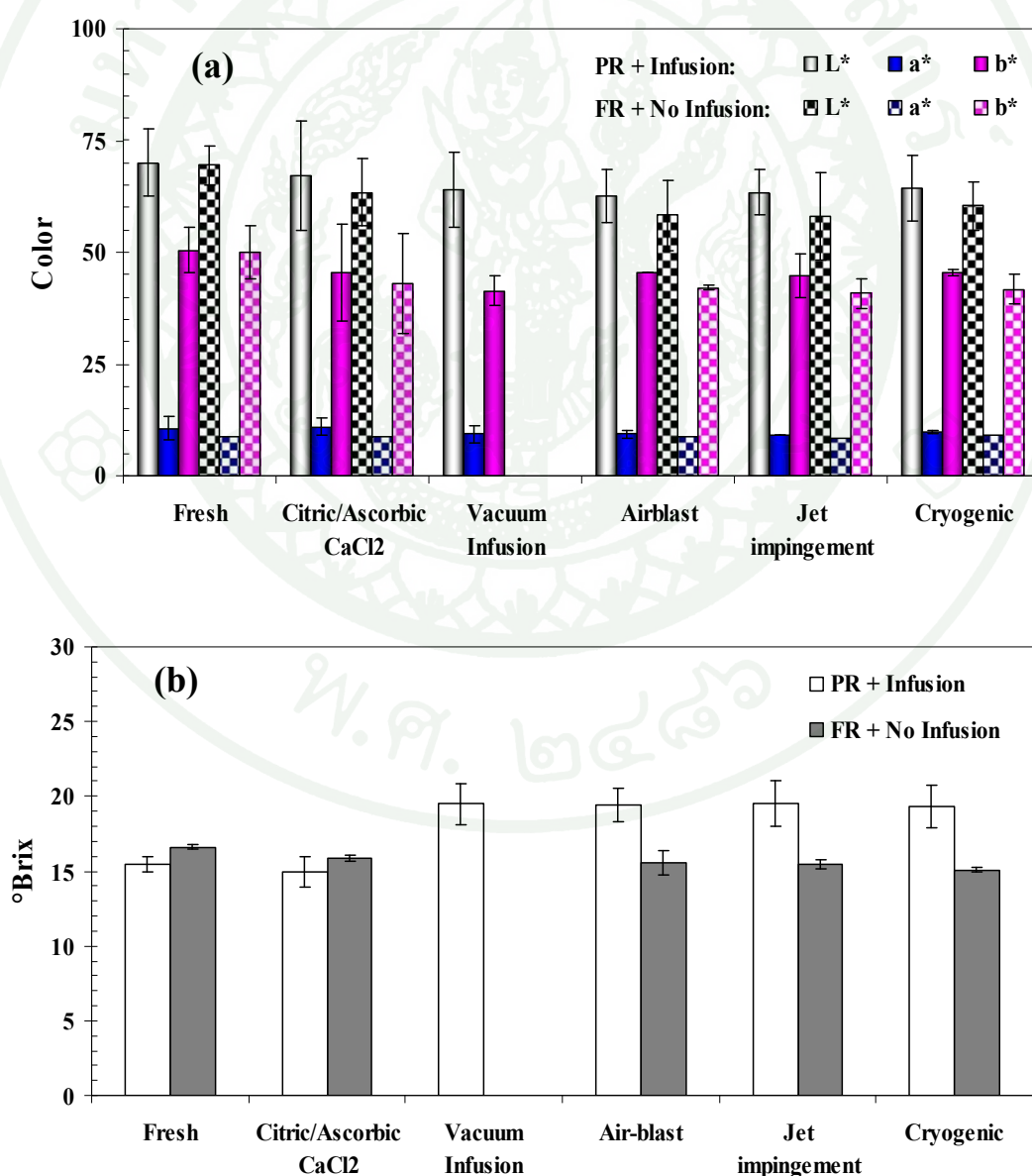
การเปลี่ยนแปลงลักษณะของมะม่วงสุกน้อย (2 วัน) และมะม่วงสุก (3 วัน) ในระหว่างกระบวนการก่อนการแช่เยือกแข็ง และระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็งได้แสดงไว้ในภาพที่ 15 ค่า L^* , a^* และ b^* ของมะม่วงสุก (R) ในทุกๆขั้นตอนมีค่าน้อยกว่าของมะม่วงสุกน้อย (VI) (ภาพที่ 15a) ซึ่งค่าที่น้อยกว่าของมะม่วงสุกนั้นได้สอดคล้องกับการที่มีสีเหลือง/ส้มเข้มขึ้น (ภาพที่ 16) และพบว่าการแช่ในสารละลายกรดซิตริก/แอสคอบิก และ สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ มีผลต่อมะม่วงสุกน้อยและมะม่วงสุกในลักษณะเดียวกัน คือ มะม่วงที่มีค่า L^* และ b^* ต่ำ หมายถึงมะม่วงมีสีคล้ำขึ้นและมีสีเหลืองน้อยลง โดยค่า L^* และ b^* ของมะม่วงสุกมีค่าลดลงมากกว่ามะม่วงสุกน้อย ค่า a^* ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่เด่นชัด ขั้นตอนการอินฟิวชันเป็นสาเหตุให้เกิดการลดลงของค่า L^* , a^* และ b^* มากขึ้นในมะม่วงสุกน้อย ในลักษณะที่มีสีคล้ำขึ้นและและมีสีแดงและสีเหลืองน้อยลง การแช่เยือกแข็ง/การทำละลายมีส่วนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีของมะม่วงทั้งสองแบบเพิ่มขึ้น โดยส่งผลให้ค่า L^* ลดลง ซึ่ง L^* ของมะม่วงสุกจะลดลงมากกว่าของมะม่วงสุกน้อย ค่า a^* ของมะม่วงทั้งสองแบบไม่มีการเปลี่ยนแปลง ค่า b^* ของมะม่วงสุกไม่มีการเปลี่ยนแปลงใน

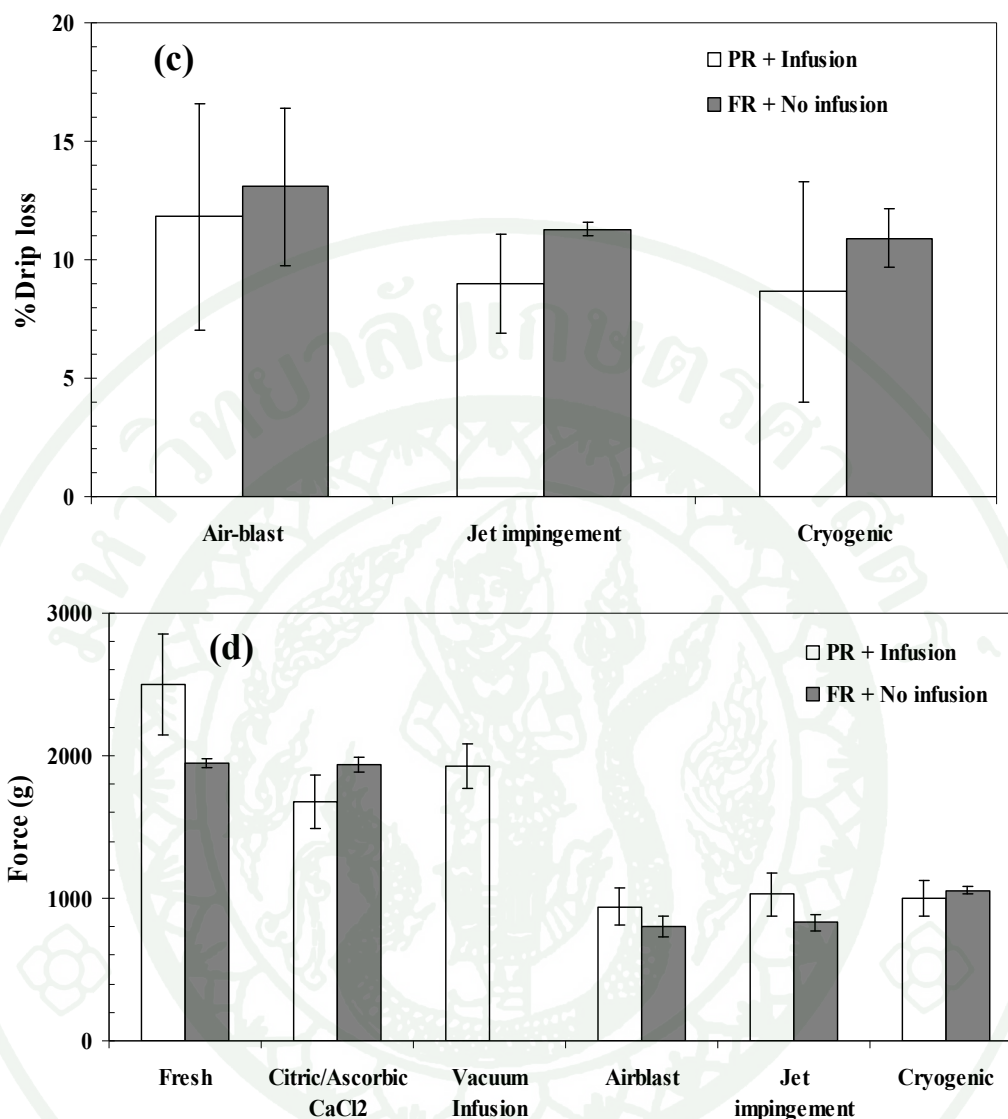
ขณะที่ของมะม่วงสุกน้อยกลับมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งบอกได้ว่ามะม่วงสุกน้อยมีค่าความเป็นสีเหลืองมากขึ้น

เมื่อพิจารณาถึงลักษณะของเนื้อสัมผัส (ภาพที่ 15d) การแช่ในสารละลายกรดซิตริก/แอสคอบิก และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ มีผลทำให้เนื้อสัมผัสของมะม่วงสุกน้อยนุ่มมากขึ้นกว่ามะม่วงสุก อย่างไรก็ตาม หลังการอินฟิวชันสารละลายผสมระหว่างน้ำมะม่วงกับน้ำตาล มีผลช่วยปรับปรุงให้โครงสร้างของมะม่วงสุกน้อยแข็งแรงขึ้น อาจเนื่องมาจากการที่ได้มีการเติมน้ำตาลซูโครส, กลูโคส และฟรุคโตส (19.5 องศาบริกซ์, ภาพที่ 15b) ซึ่งเป็นที่ทราบกันว่าน้ำตาลเหล่านี้สามารถเพิ่มความสมบูรณ์ของโครงสร้างผลไม้ได้ (Chiralt *et al.*, 2001) ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่าหลังจากการแช่เยือกแข็งและการทำละลายแล้ว เนื้อสัมผัสของมะม่วงสุกน้อยยังคงมีความแน่นกระชับมากกว่ามะม่วงสุก นอกจากนี้ยังมีการสูญเสียน้ำหนักหลังการทำลายต่ำ (ภาพที่ 15c) ซึ่งอาจเป็นผลมาจาก ผลกระทบ 2 ข้อด้วยกัน อย่างแรก คือ โครงสร้างของมะม่วงสุกน้อยเองโดยเริ่มต้นค่อนข้างจะมีความกระชับแข็งแรงมากกว่ามะม่วงสุกเริ่มต้น (ภาพที่ 11) อย่างที่สองคือ การเติมน้ำตาล (จากสารละลายผสมน้ำมะม่วงกับน้ำตาล) เข้าไปในเนื้อมะม่วงสุกน้อย สามารถช่วยลดความเสียหายจากการสร้างผลึกน้ำแข็งในโครงสร้างของมะม่วง โดยน้ำตาลจะทำหน้าที่เป็นสารป้องกันการทำลายจากผลึกน้ำแข็ง (cryoprotectants) (Charoenrein *et al.*, 1991; Erba *et al.*, 1994; Forni *et al.*, 1997; Varanyanond *et al.*, 2001; Boonsupthip and Lee, 2003; Dit-udom-po and Pittarate, 2007) และมีรายงานอีกว่าน้ำตาลมีส่วนช่วยในการลดขนาดผลึกน้ำแข็งและเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของอาหาร (Martinez-Monzo *et al.*, 1998; Forni *et al.*, 1990; Levine and Slade, 1990; Donhowe *et al.*, 1991; Aleksandar *et al.*, 2007; Kumchoo and Yuenyongputtakal, 2007)

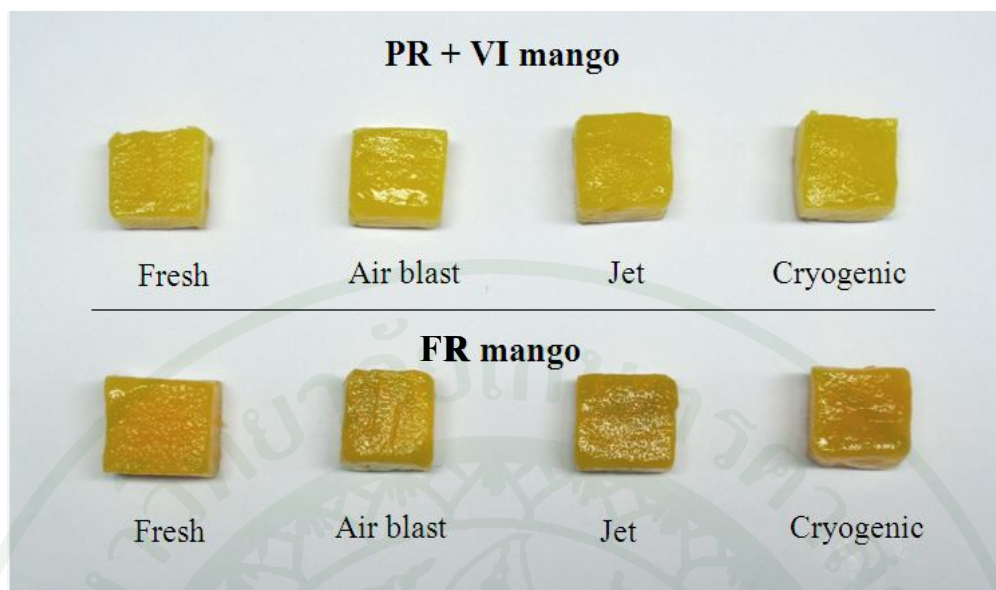
วิธีการแช่เยือกแข็งที่แตกต่างกันอย่าง air-blast, jet impingement และ cryogenic มีผลกระทบน้อยมากต่อค่า a^* และ b^* แต่มีผลมากกับค่า L^* , ค่าแรงกด และค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังการทำลาย โดยค่า L^* และ ค่าแรงกดลดลงอย่างมากในการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่อง air-blast และน้อยที่สุดในการแช่เยือกแข็งด้วย cryogenic ค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังการทำลายมีค่ามากที่สุดเมื่อแช่เยือกแข็งแบบ air-blast และน้อยที่สุดสำหรับแบบ cryogenic และเป็นที่น่าสังเกตว่าการแช่เยือกแข็งแบบ jet impingement ทำให้มะม่วงมีค่าสี เนื้อสัมผัส และการสูญเสียน้ำหนักหลังการทำลายใกล้เคียงกับการแช่เยือกแข็งแบบ cryogenic อย่างมาก ที่เป็นไปในลักษณะนี้สามารถอธิบายโดยใช้หลักการของอัตราการแช่เยือกแข็งและความสัมพันธ์ของการรักษาคุณภาพ เป็นที่ทราบดีว่า

อัตราการแช่เยือกแข็งสูงขึ้นจะช่วยรักษาคุณภาพอาหารแช่เยือกแข็งได้ดี (Bomben *et al.*, 1983; Otero *et al.*, 2000; Sun and Li, 2003; Buggenhout *et al.*, 2006) ในการศึกษาพบว่า อัตราการแช่เยือกแข็งโดยเครื่อง cryogenic, jet impingement และ air-blast มีค่าประมาณ 8, 7 and 5 °C/min ตามลำดับ ดังนั้น ความแตกต่างของสีและลักษณะเนื้อสัมผัส (ค่าแรงกด และค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังการทำละลาย) มีการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกับอัตราการแช่เยือกแข็ง จะสังเกตได้ว่าค่า L*, ค่าแรงกด และค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังการทำละลายของมะม่วงสุกน้อยได้รับผลกระทบน้อยกว่ามะม่วงสุก จากผลดังกล่าวจะเห็นได้ว่า โครงสร้างของมะม่วงสุกน้อยมีความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการแช่เยือกแข็งมากกว่ามะม่วงสุก





ภาพที่ 15 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงลักษณะของมะม่วงสุกน้อย (PR, 2 วัน) และ มะม่วงสุก (FR, 3 วัน) ในระหว่างกระบวนการ: มะม่วงสด, การแช่มะม่วง PR และ FR ในสารละลายกรดซิตริกและแคลเซียมคลอไรด์ จากนั้นมะม่วงสุกน้อยผ่านการอินฟิว ด้วยสารละลายผสมระหว่างน้ำมะม่วง 5 องศาบริกซ์และน้ำตาล ที่ 74.66 kPa เป็นเวลา 10 นาที (มะม่วงสุกไม่ผ่านการอินฟิวชัน) ต่อมามะม่วงจะถูกนำมาแช่เยือกแข็งและทำการละลาย โดยการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่อง Air-blast, Jet impingement และ Cryogenic และ (a) การเปลี่ยนแปลงค่าสี (color) (b) การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TSS ($^{\circ}$ Brix) (c) % การสูญเสียน้ำหนักหลังการทำละลาย (% Drip loss) และ (d) ความแน่นเนื้อ (Force, g)



ภาพที่ 16 ลักษณะของมะม่วงสุกน้อยที่ผ่านการอินฟิวชัน (PR+VI) และมะม่วงสุก (FR) ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีการต่างๆ

สรุปผลการทดลอง

มะม่วงสุกน้อย (บ่ม 2 วัน) มีความเหมาะสมสำหรับกระบวนการแช่เยือกแข็งมากกว่ามะม่วงสุก (บ่ม 3 วัน) โดยได้มีการปรับปรุงกลิ่น และรสชาติ ด้วยการอินฟิวชันสารละลายผสมระหว่างน้ำมะม่วง 5 องศาบริกซ์ (ซึ่งได้จากมะม่วงสุกเต็มที่, 4 วัน) และน้ำตาล (ซูโครส: กลูโคส: ฟรุคโตส ในอัตราส่วน 11:2:3.5) (ความเข้มข้นสุดท้าย 60 องศาบริกซ์ ที่ 74.66 kPa พบว่าเนื้อสัมผัสและการสูญเสียน้ำหลังการทำลายให้ค่าที่ดีขึ้น เนื่องจากความสมบูรณ์ของเนื้อสัมผัสที่สูงกว่าของมะม่วงสุกน้อย และข้อดีของผลจากการเติมน้ำตาลเข้าไปในเนื้อมะม่วง เนื้อสัมผัสมีความต้านทานต่อการแช่เยือกแข็งที่อัตราต่างๆ เพิ่มขึ้น ถึงแม้คุณภาพหลังการแช่เยือกแข็งและทำลายของมะม่วงสุกน้อยที่ผ่านการอินฟิวชันด้วยสารละลายน้ำมะม่วง+ น้ำตาล ยังไม่สามารถเทียบเท่ากับมะม่วงสุกสดที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็งได้ แต่มีคุณภาพดีกว่าคุณภาพหลังการแช่เยือกแข็งและทำลายของมะม่วงสุก (บ่ม 3 วัน) ในด้านของความชอบโดยรวมที่เกิดจากการยอมรับที่มากกว่าในด้านสีและเนื้อสัมผัสและการยอมรับที่ใกล้เคียงกันด้านกลิ่น รส มะม่วงสุกและรสหวาน

3. สถานะที่เหมาะสมสำหรับการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าปะทะไพพ่น (Jet Impingement)

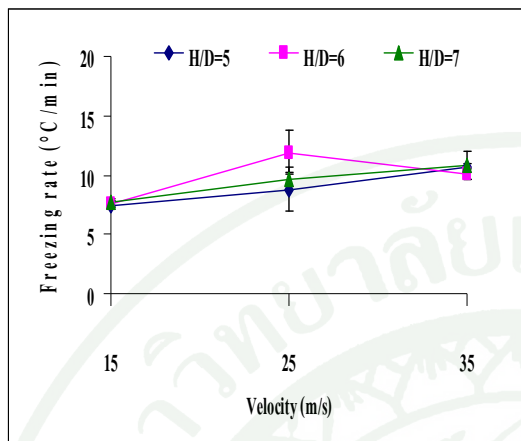
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการแช่เยือกแข็งและอัตราการแช่เยือกแข็งมะม่วง

จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการแช่เยือกแข็งมะม่วงสุกน้อย (บ่ม 2 วัน) ที่ผ่านการอินฟิวชันน้ำมะม่วง + น้ำตาลเข้าไปในเนื้อมะม่วง (มะม่วงอินฟิวชัน) และมะม่วงที่สุกเต็มที่ (บ่ม 3 วัน) ด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าปะทะไพพ่นที่ระยะ H/D เท่ากับ 5, 6 และ 7 และความเร็วลม 15, 25 และ 35 เมตรต่อวินาที สำหรับการแช่เยือกแข็งโดยใช้หัวเป่าลมหัวบนหัวเดียว และความเร็วลม 10, 15 และ 20 เมตรต่อวินาที สำหรับการแช่เยือกแข็งโดยใช้หัวเป่าลมสองหัวคือหัวบนและหัวล่าง (ภาพที่ 17 และ 18) พบว่า

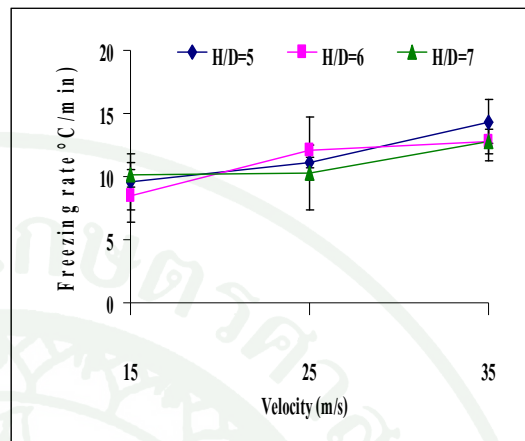
เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของสถานะการแช่เยือกแข็งต่ออัตราการแช่เยือกแข็งของมะม่วงสุกและมะม่วงอินฟิวชัน พบว่า เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น อัตราการแช่เยือกแข็งที่วัดจากอุณหภูมิจุดกึ่งกลางและที่ผิวหน้ามะม่วงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกๆระยะ H/D สำหรับมะม่วงทั้งสองชนิด ซึ่งแสดงว่าทุกๆ H/D ที่ใช้ (5-7) ด้วยความเร็วลม 15-35 เมตรต่อวินาที สำหรับหัวเป่าลมหัวเดียว และความเร็วลม 10-20 เมตรต่อวินาที สำหรับหัวเป่าลมสองหัว ลมที่พุ่งออกมาจากหัวฉีดน่าจะมีการพัฒนาการไหลจนมีลักษณะการไหลเป็น turbulent สูงสุด (fully developed) แล้ว ณ จุดก่อนถึงผิวหน้ามะม่วง โดยที่ความเร็วลมสูงสุดที่ทดสอบที่ H/D ใดๆ (เช่น 35 เมตรต่อวินาที ที่ H/D = 7 สำหรับหัวเป่าลมหัวบนหัวเดียว) จุดที่การไหลพัฒนาเป็น turbulent สูงสุดอยู่ใกล้ผิวหน้ามะม่วงมากที่สุด มีผลทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ผิวหน้ามะม่วงมากที่สุด เมื่อความเร็วลมลดลง (เช่น 25 และ 15 เมตรต่อวินาที) จุดที่การไหลพัฒนาเป็น turbulent สูงสุดอยู่ห่างผิวหน้ามะม่วงออกไปอีก มีผลทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ผิวหน้ามะม่วงลดลง ดังนั้นอัตราการแช่เยือกแข็งมะม่วงจึงลดลงเมื่อความเร็วลมลดลงเรื่อยๆ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างระยะจุดที่การไหลพัฒนาเป็น turbulent สูงสุดกับผิวหน้าอาหารและการถ่ายเทความร้อนที่ผิวหน้าอาหารได้ถูกอธิบายไว้ในหลายงานวิจัย (Soto and Borquez, 2001; Sarkar *et al.*, 2004; Sarkar and Singh, 2004) และมีรายงานที่พบอีกว่าเมื่อเพิ่มความเร็วลมและทำให้การถ่ายเทความร้อนที่ผิวหน้าอาหารมากขึ้นมีผลดีต่อคุณภาพอาหารในหลายด้านได้แก่ ปริมาณสารโอเมก้า ($n-3$ fatty acids) ในเนื้อปลาสูงขึ้น (Borquez, 2003) เป็นต้น โดยการทดลองเหล่านี้ใช้ความเร็วลมในช่วง 10-65 เมตรต่อวินาที

a) หัวเป่าลมหัวบน

a.1) ที่จุดกึ่งกลางมะม่วง

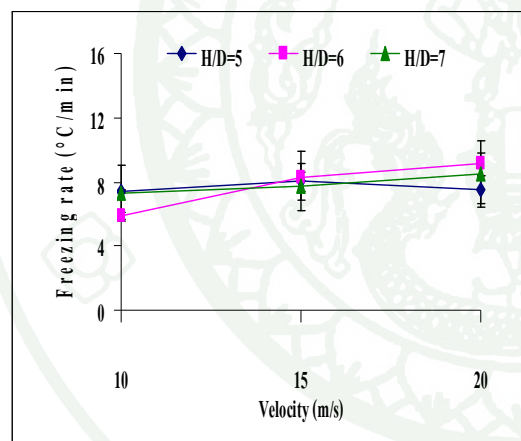


a.2) ที่จุดผิวหน้ามะม่วง

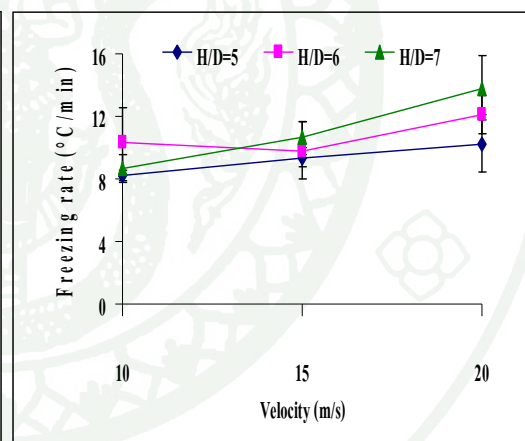


b) หัวเป่าลมหัวบน + ล่าง

b.1) ที่จุดกึ่งกลางมะม่วง



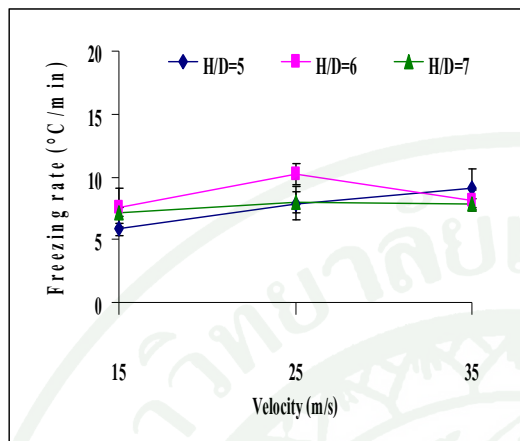
b.2) ที่จุดผิวหน้ามะม่วง



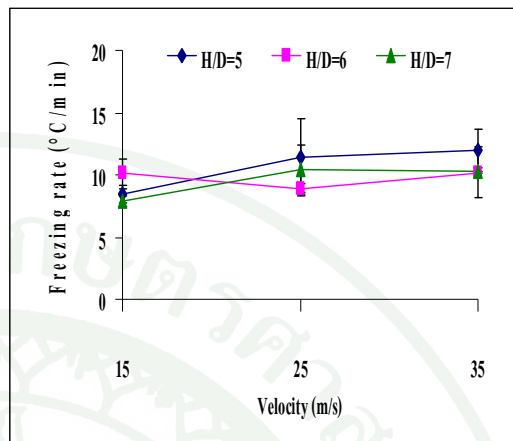
ภาพที่ 17 แสดงอัตราการแช่เยือกแข็งของมะม่วงอินฟิวชัน โดย a) หัวเป่าลมหัวบน และ b) หัวเป่าลมหัวบน + ล่าง

a) หัวเป่าลมหัวบน

a.1) ที่จุดกึ่งกลางมะม่วง

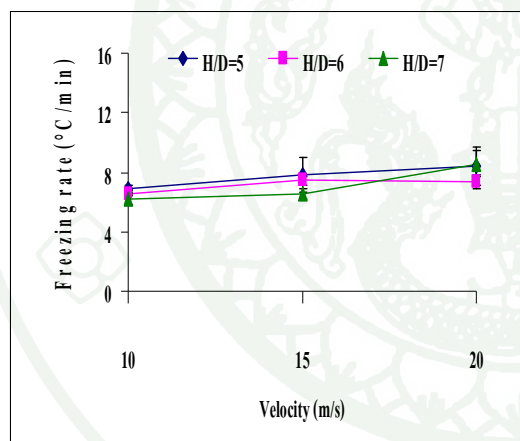


a.2) ที่จุดผิวหน้ามะม่วง

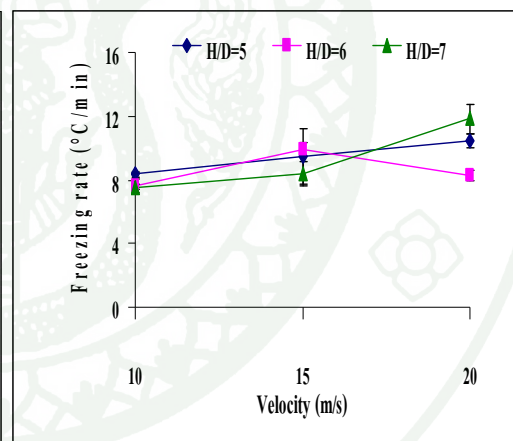


b) หัวเป่าลมหัวบน + ล่าง

b.1) ที่จุดกึ่งกลางมะม่วง

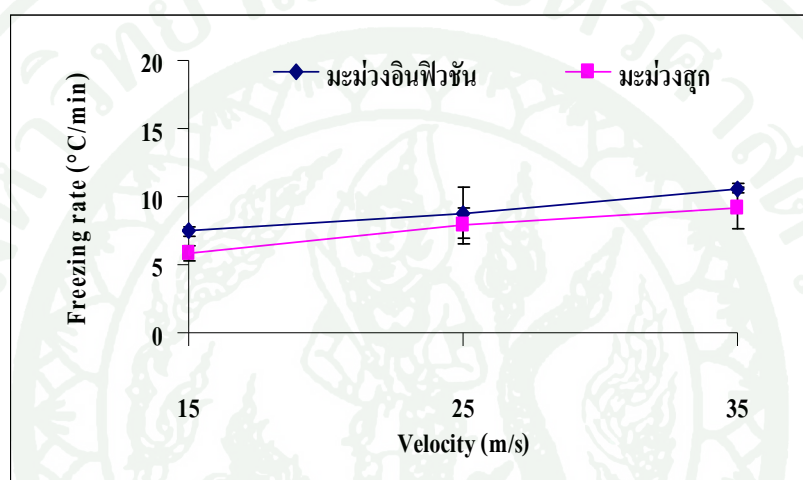


b.2) ที่จุดผิวหน้ามะม่วง



ภาพที่ 18 แสดงอัตราการแช่เยือกแข็งของมะม่วงสุกโดย a) หัวเป่าลมหัวบน และ b) หัวเป่าลมหัวบน + ล่าง

เมื่อเปรียบเทียบผลของอัตราการแช่เยือกแข็งของมะม่วงระหว่างมะม่วงสุกและมะม่วงอินฟิวชัน (ภาพที่ 17 และ 18) พบว่า การแช่เยือกแข็งมะม่วงอินฟิวชันมีอัตราการเร็วในการแช่เยือกแข็งที่สูงกว่ามะม่วงสุกทั้งที่วัดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิใจกลางอาหารและอุณหภูมิที่ผิวอาหาร (แสดงกราฟเปรียบเทียบเป็นตัวอย่าง ดังภาพที่ 19) ทั้งที่มีการใช้หัวเป่าลมหัวเดียวและใช้ทั้งสองหัว อาจเนื่องมาจากการอินฟิวชันมีส่วนช่วยลดปริมาณน้ำที่มีอยู่ในเนื้อมะม่วง จึงใช้เวลาในการแช่เยือกแข็งน้อยลง (Li and Sun, 2002)



ภาพที่ 19 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบอัตราการแช่เยือกแข็งระหว่างมะม่วงอินฟิวชันและมะม่วงสุก ที่ $H/D = 5$, หัวเป่าลมหัวบน

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการแช่เยือกแข็งและคุณภาพมะม่วงแช่เยือกแข็ง

เมื่อเปรียบเทียบผลของสภาวะต่างๆ ที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าปะทะ พบว่า ทุกๆ H/D เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น แนวโน้มของการสูญเสียความแน่นเนื้อของมะม่วง (% Force loss) มีค่าลดลงทั้งของมะม่วงสุกและมะม่วงอินฟิวชัน (ภาพที่ 20) ทั้งที่ใช้หัวเป่าหัวเดียวและหัวเป่าทั้งสองหัว เนื่องจากเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น อัตราการแช่เยือกแข็งสูงขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์แข็งเกิดขึ้นมีขนาดเล็ก ส่งผลให้การถูกทำลายของเนื้อเยื่อลดลง

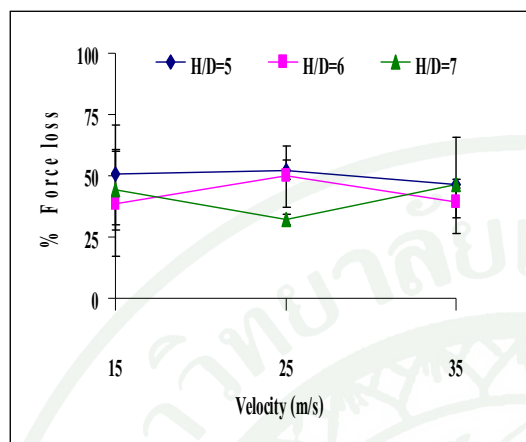
ในบางสภาวะการแช่เยือกแข็งมะม่วงจะมีการสูญเสียความแน่นเนื้อมากเป็นพิเศษ (% Force loss มีค่ามาก) เช่น มะม่วงอินฟิวชัน ที่ระยะ H/D เท่ากับ 7 เมื่อใช้หัวเป่าหัวเดียว และที่ระยะ H/D เท่ากับ 5 และ 7 เมื่อใช้หัวเป่าสองหัว พบว่าการสูญเสียความแน่นเนื้อกลับเพิ่มสูงขึ้น

เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วลมสูงขึ้นเป็น 35 เมตรต่อวินาที อาจเนื่องมาจาก ลมที่ความเร็วสูง เมื่อลงมา กระแทกที่ผิวหนังจะมีความแรงมาก ส่งผลให้เนื้อเยื่อที่ผิวหนังม้วนงอถูกทำลายมากขึ้น เนื้อเยื่อจึงทนต่อการแซ่เยือกแข็งน้อยลง อีกทั้งจะเห็นได้ว่าเมื่อ H/D เท่ากับ 5 มีการสูญเสียความแน่นเนื้อที่สูงกว่าระยะ H/D ที่ 6 และ 7 น่าจะเป็นเพราะระยะห่างระหว่างหัวเป่าลมและผิวหนังม้วนงอที่น้อยกว่า จะทำให้ม้วนงอได้รับแรงลมกระแทกที่สูงกว่า ทำให้เนื้อเยื่อได้รับความเสียหายมากกว่า

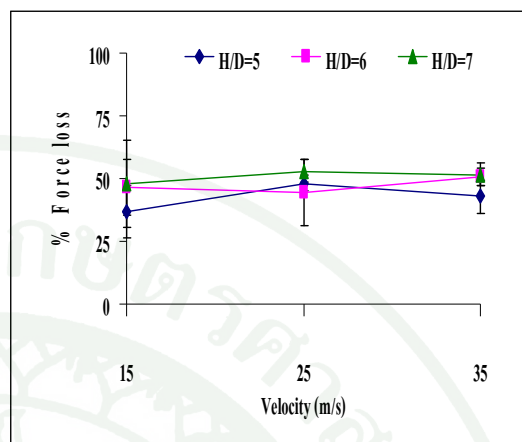
เมื่อเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนแปลงลักษณะของเนื้อเยื่อของมะม่วงระหว่างมะม่วงสุกและมะม่วงอินฟิวชัน (ภาพที่ 20) พบว่า มะม่วงที่ผ่านการอินฟิวชัน มีการเปลี่ยนแปลงเนื้อเยื่อ (% Force loss) ที่ใกล้เคียงหรือมากกว่ามะม่วงสุกในบางสภาวะ อาจเป็นเพราะบริเวณผิวของมะม่วงอินฟิวชันนั้นเนื้อเยื่ออาจถูกทำลายด้วยความดันมากกว่าบริเวณใจกลางของชิ้น ทำให้เนื้อเยื่อเกิดความเสียหาย ทำให้บริเวณผิวมีลักษณะที่นิ่มมากกว่าบริเวณใจกลาง เมื่อทำการวัดความแน่นเนื้อของชิ้นมะม่วงด้วยการกดจากผิวลงไป 50 % ของความสูงของชิ้นมะม่วงนั้นที่บริเวณผิวซึ่งมีความนิ่มมากกว่าจึงทำให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อที่มีความใกล้เคียงหรือมากกว่าในมะม่วงสุกซึ่งมีเนื้อเยื่อที่มีความนิ่มสม่ำเสมอทั้งชิ้น

a) หัวเป่าลมหัวบน

a.1) มะม่วงอินพืวจัน

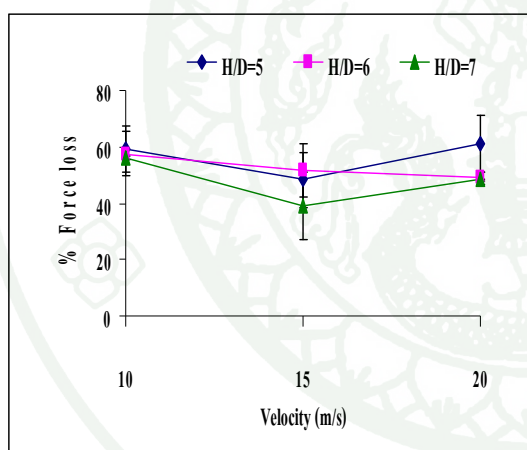


a.2) มะม่วงสุก

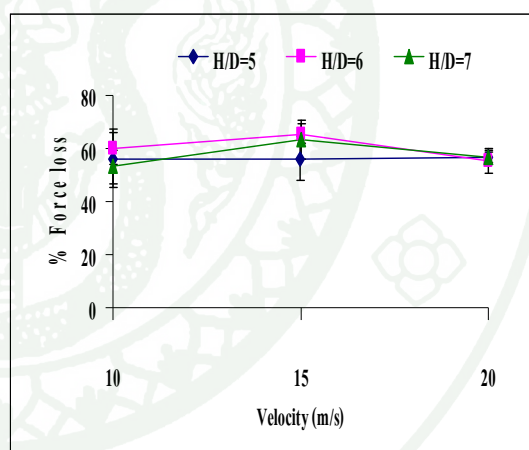


b) หัวเป่าลมหัวบน + ล่าง

b.1) มะม่วงอินพืวจัน



b.2) มะม่วงสุก



ภาพที่ 20 แสดง %การสูญเสียความแน่นเนื้อของมะม่วงโดย a) หัวเป่าลมหัวบน และ b) หัวเป่าลมหัวบน + ล่าง

3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการแช่เยือกแข็งและ % การสูญเสียน้ำหนักหลังการทำ ละลาย

เมื่อเปรียบเทียบผลของสภาวะต่างๆ ที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าปะทะ พบว่า ทุกๆ H/D เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น แนวโน้ม % การสูญเสียน้ำหนักหลังการทำละลายของมะม่วงมีค่าลดลงทั้งของมะม่วงสุกและมะม่วงอินฟิวชัน (ภาพที่ 21) ทั้งที่ใช้หัวเป่าหัวเดียวและหัวเป่าทั้งสองหัว เนื่องจากเมื่อความเร็วลมสูงขึ้น ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้น้ำเยื่อที่ถูกทำลายด้วยผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กนั้นมีความเสียหายน้อยกว่า และการที่ความเร็วลมสูงขึ้นทำให้แรงลมที่กระทบที่ผิวหน้าของอาหารสูงขึ้น อาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ผิวหน้าเป็นโครงสร้างที่แข็งขึ้น ทำให้เมื่อทำการละลายแล้วน้ำที่ออกมาจากเซลล์ได้ยากขึ้น

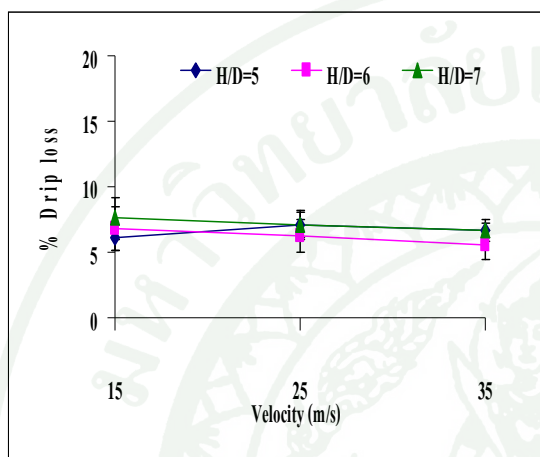
เป็นที่น่าสังเกตว่าที่ H/D เท่ากับ 5 ที่ความเร็วลมต่ำสุด เท่ากับ 15 เมตรต่อวินาที ของมะม่วงอินฟิวชันเมื่อใช้หัวเป่าหัวเดียวมีค่า % การสูญเสียน้ำหนักหลังการทำละลายดำนั้น อาจเนื่องมาจากความเร็วลมที่ต่ำทำให้ผิวหน้าของมะม่วงไม่ถูกลมกระทบทำลายมาก ด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งที่เร็วพอควรทำให้เซลล์มะม่วงถูกทำลายเล็กน้อย น้ำที่จรั่วออกมาจากเซลล์ยังถูกอุ้มได้ดีไม่หลุดออกจากผิวหน้ามะม่วงนี้ อีกทั้งยังมีน้ำตาลที่เดิมเข้าไปที่เข้าไปเคลือบที่ผิวไม่ให้เนื้อเยื่อถูกทำลายมากขึ้น ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำน้อยลงหลังการทำละลายน้ำแข็ง

เมื่อเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนแปลงลักษณะของเนื้อเยื่อของมะม่วงระหว่างมะม่วงสุกและมะม่วงอินฟิวชัน (ภาพที่ 21) พบว่า มะม่วงที่ผ่านการอินฟิวชันมี % การสูญเสียน้ำหนักหลังการทำละลายที่ต่ำกว่ามะม่วงสุก ซึ่งเป็นผลมาจากมะม่วงอินฟิวชันนั้นมีโครงสร้างเริ่มต้นของเนื้อเยื่อที่แข็งแรงกว่ามะม่วงสุก จึงทำให้ทนต่อการถูกทำลายของผลึกน้ำแข็งได้มากกว่า และการอินฟิวชันเพื่อเติมน้ำตาลเข้าไปในเนื้อเยื่อของมะม่วงเหมือนเป็นการไปเคลือบที่ผิวมะม่วง ทำให้เนื้อเยื่อมะม่วงดังกล่าวมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (Chiralt *et al.*, 2001) และเพิ่มคุณสมบัติการอุ้มน้ำ (water holding capacity) (Martinez-Monzo *et al.*, 1998; Forni *et al.*, 1990; Levine and Slade, 1990; Donhowe *et al.*, 1991; Aleksandar *et al.*, 2007; Kumchoo and Yuenyongputtakal, 2007; Vergara-Valencia *et al.*, 2007) และการเติมน้ำตาลเข้าไปในเนื้อเยื่อของมะม่วงยังไปช่วยลดปริมาณน้ำในเซลล์ ส่งผลให้เซลล์จึงทำให้ปริมาณน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อลดลง ทำให้เมื่อทำการละลาย

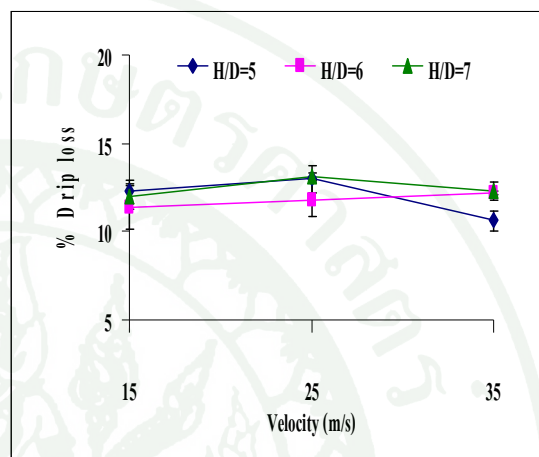
แล้วจะมีปริมาณน้ำที่ออกจากโครงสร้างเซลล์ลดลงเนื่องจากเนื้อเยื่อถูกทำลายน้อยลง (Li and Sun, 2002)

a) หัวเป่าลมหัวบน

a.1) มะม่วงอินพื้ชัน

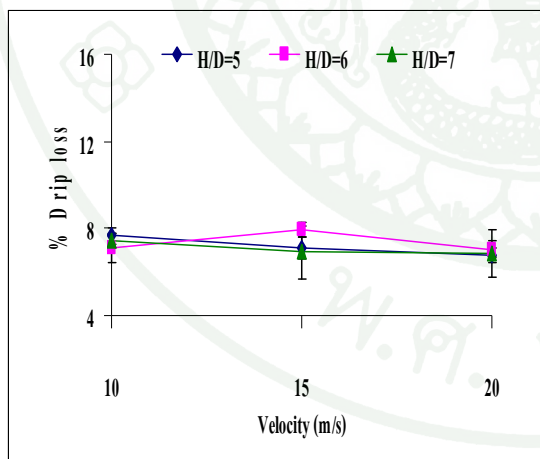


a.2) มะม่วงสุก

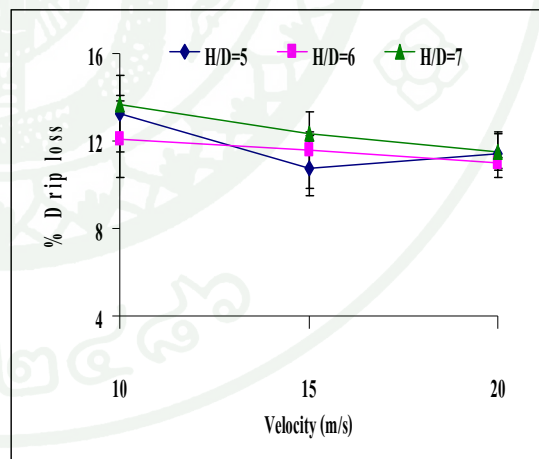


b) หัวเป่าลมหัวบน + ล่าง

b.1) มะม่วงอินพื้ชัน



b.2) มะม่วงสุก



ภาพที่ 21 แสดง % การสูญเสียน้ำหนักหลังการทำละลายของมะม่วงโดย a) หัวเป่าลมหัวบน และ b) หัวเป่าลมหัวบน + ล่าง

3.4 ผลของปัจจัยการแช่เยือกแข็งต่อลักษณะกายภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็ง

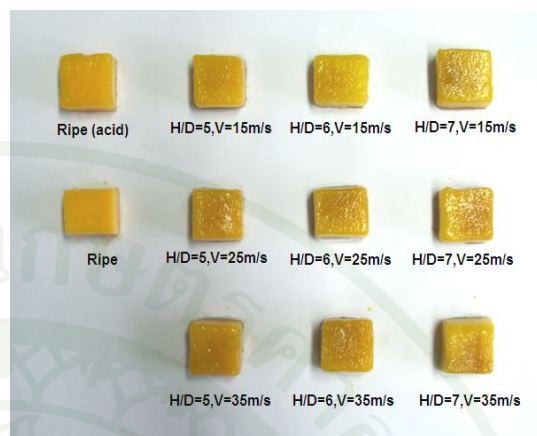
จากภาพที่ 22 จะเห็นว่า เมื่อผ่านการแช่เยือกแข็งที่สภาวะต่างๆ ของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าปะทะ พบว่าที่ H/D และความเร็วลมที่แตกต่างกัน ไม่ได้ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าสีจากตัวอย่างเริ่มต้นมากนักในมะม่วงอินฟิวชัน โดยพบว่าเนื้อไม้ลักษณะใสขึ้น และสีของเนื้อในแต่ละสภาวะไม่มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสีที่อาจแตกต่างกันบ้างนั้นอาจเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของสีเนื้อของมะม่วงแต่ละผลไม่เท่ากัน และพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสีของมะม่วงสุกพบว่ามะม่วงอินฟิวชันหลังการแช่เยือกแข็งและการทำละลายมีสีที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน และมะม่วงสุกเป็นไปในลักษณะเดียวกัน สีของเนื้อในแต่ละสภาวะไม่มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด แต่พบว่ามะม่วงหลังจากผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็งและการทำละลายแล้วจะมีสีน้ำตาลเกิดขึ้นที่ผิวมะม่วงเล็กน้อย ซึ่งแตกต่างจากมะม่วงก่อนการแช่เยือกแข็งอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งอาจเป็นผลมาจากเนื้อเยื่อมะม่วงสุกนั้นมีความแข็งแรงน้อยกว่า มะม่วงสุกน้อย เมื่อผ่านการแช่เยือกแข็งเนื้อเยื่อถูกทำลายด้วยผลึกน้ำแข็ง ส่งผลให้เนื้อเยื่อเกิดการฉีกขาด และจากแรงปะทะของลมที่มีความเร็วสูงอาจเกิดรอยชำ เมื่อสัมผัสกับอากาศจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์ โพลีฟีนอลออกซิเดส (Polyphenol oxidase) (ศุทธิพร, 2540; Arogba, 2000; Ajila *et al.*, 2007) ซึ่งถึงแม้ว่ามะม่วงดังกล่าวได้ผ่านกระบวนการเตรียมขั้นต้น โดยทำการแช่สารที่ช่วยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์แล้วก็ตาม

a) หัวเป่าลมหัวบน

a.1) มะม่วงอินพื้ชั้น



a.2) มะม่วงสุก



b) หัวเป่าลมหัวบน + หัวล่าง

b.1) มะม่วงอินพื้ชั้น



b.2) มะม่วงสุก



ภาพที่ 22 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของมะม่วงก่อนและหลังการแช่เยือกแข็งที่สภาวะต่างๆ ของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าปะทะ และการทำละลาย

3.5 ปัจจัยการแช่เยือกแข็งที่เหมาะสมต่อการแช่เยือกแข็งมะม่วง

เมื่อทำการพิจารณาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาเลือกสภาวะของ H/D, ความเร็วลม (เมตร/วินาที) ที่ให้ค่าคุณลักษณะของมะม่วงแช่เยือกแข็งโดยรวมค่อนข้างดี (ตารางที่ 7 และ 8) พบว่า

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแช่เยือกแข็งมะม่วงอินฟิวชันโดยใช้หัวเป่าลมหัวบน คือ $H/D = 6$ และความเร็วลม = 35 เมตรต่อวินาที (6,35) โดยให้ค่าอัตราการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิผิวเท่ากับ 12.71 องศาต่อนาที, ค่าอัตราการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิใจกลางเท่ากับ 10.07 องศาต่อนาที, %การสูญเสียความแน่นเนื้อ เท่ากับ 39.52, % การสูญเสียน้ำหนักหลังการทำละลาย เท่ากับ 5.57

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแช่เยือกแข็งมะม่วงอินฟิวชันโดยใช้หัวเป่าลมหัวบน + หัวล่าง คือ $H/D = 7$ และความเร็วลม = 20 เมตรต่อวินาที (7,20) โดยให้ค่าอัตราการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิผิวเท่ากับ 13.80 องศาต่อนาที, ค่าอัตราการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิใจกลางเท่ากับ 8.50 องศาต่อนาที, %การสูญเสียความแน่นเนื้อ เท่ากับ 48.11, %การสูญเสียน้ำหนักหลังการทำละลาย เท่ากับ 6.86

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแช่เยือกแข็งมะม่วงสุกโดยใช้หัวเป่าลมหัวบนคือ $H/D = 5$ และความเร็วลม = 35 เมตรต่อวินาที (5,35) โดยให้ค่าอัตราการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิผิวเท่ากับ 11.97 องศาต่อนาที, ค่าอัตราการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิใจกลางเท่ากับ 9.14 องศาต่อนาที, %การสูญเสียความแน่นเนื้อ เท่ากับ 42.84, % การสูญเสียน้ำหนักหลังการทำละลาย เท่ากับ 10.60

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแช่เยือกแข็งมะม่วงสุกโดยใช้หัวเป่าลมหัวบน + หัวล่าง คือ $H/D = 5$ และความเร็วลม = 15 เมตรต่อวินาที (5,15) โดยให้ค่าอัตราการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิผิวเท่ากับ 9.44 องศาต่อนาที, ค่าอัตราการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิใจกลางเท่ากับ 7.83 องศาต่อนาที, % การสูญเสียความแน่นเนื้อ เท่ากับ 56.26, %การสูญเสียน้ำหนักหลังการทำละลาย เท่ากับ 10.76

ตารางที่ 7 แสดงผลของปัจจัยการแช่เยือกแข็งต่อคุณลักษณะต่างๆ เพื่อพิจารณาหาสภาวะที่ให้
คุณลักษณะมะม่วงแช่เยือกแข็งที่ดีที่สุดสำหรับห้วเป่าลมห้วบน

คุณภาพมะม่วง	ปัจจัยการแช่เยือกแข็งที่ส่งผลดี (มาก → น้อย)
อัตราการแช่เยือกแข็ง	
- อุณหภูมิที่ผิวอาหาร	มะม่วงอินฟิวชั่น (VI) $(5,35) >>> (6,35) \sim (7,35) > (6,25) > (5,25) > (7,25) \sim (7,15) > (5,15) > (6,15)$
	มะม่วงสุก (R) $(5,35) > (5,25) > (7,25) \sim (7,35) \sim (6,35) \sim (6,15) > (6,25) > (5,15) > (7,15)$
- อุณหภูมิที่ใจกลางอาหาร	มะม่วงอินฟิวชั่น (VI) $(6,25) >> (7,35) \sim (5,35) > (6,35) > (7,25) > (5,25) > (7,15) \sim (6,15) \sim (5,15)$
	มะม่วงสุก (R) $(6,25) >> (5,35) > (6,35) > (7,25) \sim (5,25) \sim (7,35) \sim (6,15) > (7,15) >> (5,15)$
% Force loss	มะม่วงอินฟิวชั่น (VI) $(7,25) > (6,35) \sim (6,15) > (7,15) > (5,35) \sim (7,35) > (6,25) > (5,15) > (5,25)$
	มะม่วงสุก (R) $(5,15) >> (5,35) \sim (6,25) > (6,15) > (7,15) > (5,25) > (6,35) > (7,35) > (7,25)$
% Drip loss	มะม่วงอินฟิวชั่น (VI) $(6,35) > (5,15) \sim (6,25) \sim (7,35) \sim (5,35) \sim (6,15) > (7,25) \sim (5,25) \sim (7,15)$
	มะม่วงสุก (R) $(5,35) >> (6,15) \sim (6,25) \sim (7,15) > (6,35) \sim (5,15) \sim (7,35) > (5,25) > (7,25)$

ตัวเลขในวงเล็บ คือ (H/D, ความเร็วลม)

ตารางที่ 8 แสดงผลของปัจจัยการแช่เยือกแข็งต่อคุณลักษณะต่างๆ เพื่อพิจารณาหาสภาวะที่ให้
คุณลักษณะมะม่วงแช่เยือกแข็งที่ดีที่สุดสำหรับห้วเปาลมห้วบน + ล่าง

คุณภาพมะม่วง	ปัจจัยการแช่เยือกแข็งที่ส่งผลดี (มาก → น้อย)
อัตราการใช้เยือกแข็ง	
- อุณหภูมิที่ผิวอาหาร	มะม่วงอินฟิวชัน (VI) $(7,20) > (6,20) > (7,15) \sim (6,15) \sim (5,20) > (6,15) \sim (5,15) > (7,10) \sim (5,10)$
	มะม่วงสุก (R) $(7,20) > (5,20) > (5,15) \sim (6,15) > (7,15) \sim (5,10) \sim (6,20) > (6,10) \sim (7,10)$
- อุณหภูมิที่ใจกลางอาหาร	มะม่วงอินฟิวชัน (VI) $(6,20) > (7,20) \sim (6,15) \sim (7,15) > (7,15) > (5,20) > (5,10) > (7,10) > (6,10)$
	มะม่วงสุก (R) $(7,20) \sim (5,20) > (5,15) \sim (6,15) \sim (6,20) > (5,10) \sim (6,10) \sim (7,15) \sim (7,10)$
% Force loss	มะม่วงอินฟิวชัน (VI) $(7,15) >> (7,20) \sim (6,20) > (6,10) > (5,15) \sim (7,10) > (6,15) > (5,10) > (5,20)$
	มะม่วงสุก (R) $(7,10) > (6,20) > (5,15) \sim (5,10) \sim (7,20) \sim (5,20) > (6,10) > (7,15) > (6,15)$
% Drip loss	มะม่วงอินฟิวชัน (VI) $(7,20) \sim (5,20) \sim (7,15) > (6,20) \sim (5,15) \sim (6,10) \sim (7,10) \sim (5,10) \sim (6,15)$
	มะม่วงสุก (R) $(5,15) > (6,20) \sim (5,20) \sim (7,20) \sim (6,15) > (6,10) \sim (7,15) > (5,10) \sim (7,10)$

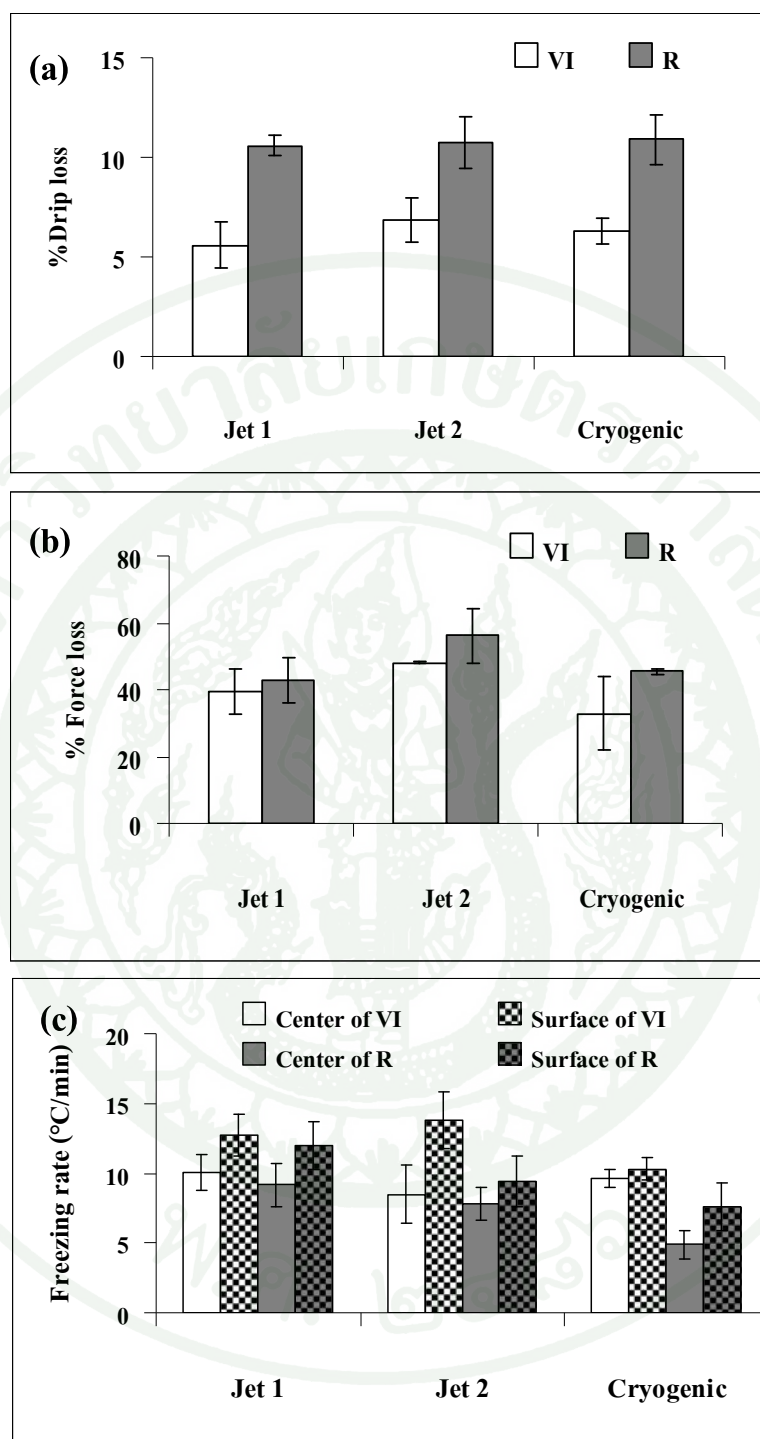
ตัวเลขในวงเล็บ คือ (H/D, ความเร็วลม)

3.6 เปรียบเทียบการแช่เยือกแข็งแบบต่างๆ

เมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าปะทะไอฟัน สำหรับมะม่วงสุกและมะม่วงอินพืวชัน มาทำการเปรียบเทียบกับเครื่องแช่เยือกแข็งไครโอจินิก ซึ่งเป็นเครื่องแช่เยือกแข็งที่ให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดีเยี่ยม (ภาพที่ 23) พบว่าสภาวะที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบครั้งนี้คือ สำหรับมะม่วงอินพืวชัน (VI) คือ Jet1: 6,35, Jet2: 7,20 และสำหรับมะม่วงสุก (R) คือ Jet1: 5,35, Jet2: 5,15 โดย Jet 1 คือการใช้หัวเป่าลมหัวบน และ Jet 2 คือการใช้หัวเป่าลมหัวบน + ล่าง พบว่า การแช่เยือกแข็งมีผลกระทบต่อค่า %การสูญเสีย น้ำหนักหลังการทำละลาย โดยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าปะทะไอฟันและแบบไครโอจินิก นั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากสำหรับมะม่วงสุกและมะม่วงอินพืวชัน และยังพบอีกว่ามะม่วงอินพืวชันมีค่าการสูญเสียน้ำหนักที่ต่ำกว่าของมะม่วงสุกอย่างเห็นได้ชัด และในส่วนของ Jet 1 ซึ่งใช้หัวเป่าหัวเดียวและความเร็วลมที่ค่อนข้างสูงให้ค่า %การสูญเสียน้ำหนักหลังการทำละลายต่ำที่สุด และต่ำกว่าแบบไครโอจินิกเล็กน้อย

สำหรับ %การสูญเสียความแน่นเนื้อ ของมะม่วงทั้งสองชนิด พบว่า เครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าปะทะไอฟัน Jet 2 ให้ค่า %การสูญเสียความแน่นเนื้อที่สูงกว่าแบบไครโอจินิกทั้งในมะม่วงสุกและมะม่วงอินพืวชัน และพบว่า Jet 1 สำหรับมะม่วงสุกและมะม่วงอินพืวชัน ให้ค่า %การสูญเสียความแน่นเนื้อไม่แตกต่างจากการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องไครโอจินิกมากนัก

ส่วนเมื่อเปรียบเทียบอัตราการแช่เยือกแข็งพบว่าการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแบบลมเป่าปะทะไอฟันแบบ Jet 1 และ Jet 2 ให้อัตราการแช่เยือกแข็งที่สูงกว่าแบบไครโอจินิก ทั้งมะม่วงสุกและมะม่วงอินพืวชัน ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ผลึกน้ำแข็งในเนื้อเยื่อของมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและการทำลายของมะม่วงที่แช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแบบลมเป่าปะทะไอฟันมีขนาดเล็กกว่ากับแบบไครโอจินิก ซึ่งน่าจะเป็นผลให้ค่า %การสูญเสียน้ำหนักหลังการทำละลาย และ %การสูญเสียความแน่นเนื้อต่ำกว่า แต่เนื่องจากมีลมเป่าปะทะที่ค่อนข้างแรง จึงส่งผลให้ค่าทั้งสองสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามผลของแรงปะทะไม่มากนัก จึงทำให้สุดท้ายแล้วมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแบบลมเป่าปะทะไอฟัน มีคุณภาพดีเทียบเท่าแบบไครโอจินิก และพบว่าการใช้หัวเป่าลมหัวบนที่ความเร็วสูงให้ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่าการใช้ทั้งหัวบน + หัวล่างที่ความเร็วที่ต่ำ



ภาพที่ 23 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงลักษณะของมะม่วงอินฟิวชัน โดยการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่อง Jet impingement (VI = Jet1: 6,35, Jet2: 7,20) , (R = Jet1: 5,35, Jet2: 5,15) และ Cryogenic โดย (a) % การสูญเสียน้ำหนักหลังการทำละลาย [% Drip loss] (b) %การสูญเสียความแน่นเนื้อ [% Force loss] (c) อัตราการแช่แข็ง [Freezing rate]

จากผลการทดลองดังกล่าวจะเห็นได้ว่า วิธีการแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าปะทะไอฟันซึ่งเป็นวิธีการแช่เยือกแข็งแบบใหม่ สามารถนำมาใช้แช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์โดยเฉพาะมะม่วงได้เป็นอย่างดีเมื่อเปรียบเทียบคุณภาพของมะม่วงหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลายกับการแช่เยือกแข็งแบบโคร โอจินิกทั้งในด้าน ค่า %การสูญเสียน้ำหนักหลังการทำละลาย และ %การสูญเสียความแน่นเนื้อ และอัตราการแช่เยือกแข็ง (Londahl *et al.*, 1995; Salvadori and Mascheroni, 2002) ซึ่งแบบโคร โอจินิกเป็นวิธีการแช่เยือกแข็งที่นิยมใช้และให้คุณภาพดีแต่มีต้นทุนสูงเนื่องจากต้องใช้ไนโตรเจนเหลวเป็นตัวให้ความเย็นแก่อาหาร ส่วนการแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าปะทะไอฟันนั้นใช้ลมเย็นเป็นตัวให้ความเย็นแก่อาหาร และให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่มีความใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างมะม่วงอินฟิวชันและมะม่วงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและการทำละลายพบว่ามะม่วงอินฟิวชันให้คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ดีกว่า ดังนั้นมะม่วงอินฟิวชันจึงน่าจะเป็นมะม่วงที่มีความเหมาะสมสำหรับนำมาทำการแช่เยือกแข็งมากกว่ามะม่วงสุก

สรุปผลการทดลอง

มะม่วงสุกน้อย (บ่ม 2 วัน) ที่ถูกอินฟิวชันด้วยสารละลายผสมระหว่างน้ำมะม่วง 5 องศาบริกซ์ และน้ำตาล (ซูโครส:กลูโคส:ฟรุกโตส ในอัตรา 11:2:3.5) (อัตราส่วนระหว่างน้ำมะม่วง 5 °Brix : น้ำตาล คือ 5:55) ที่ความดัน 74.66 kPa เป็นเวลา 10 นาที ให้คุณภาพหลังการแช่เยือกแข็งและการทำละลายที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมะม่วงสุก (บ่ม 3 วัน) ทั้งในด้านของค่า %การสูญเสียน้ำหนักหลังการทำละลายและอัตราการแช่เยือกแข็ง โดยมี %การสูญเสียความแน่นเนื้อใกล้เคียงกัน และเมื่อนำมาทำการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าปะทะไอฟัน พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ การใช้หัวเป่าลมหัวบน ที่ระยะ $H/D = 6$ และความเร็วลมเท่ากับ 35 เมตรต่อวินาที โดยมะม่วงแช่เยือกแข็งที่ได้มีค่า %การสูญเสียน้ำหนักหลังการทำละลาย และ %การสูญเสียความแน่นเนื้อต่ำสุด และอัตราการแช่เยือกแข็งสูงสุด และให้ค่าที่ใกล้เคียงกับการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบโคร โอจินิก

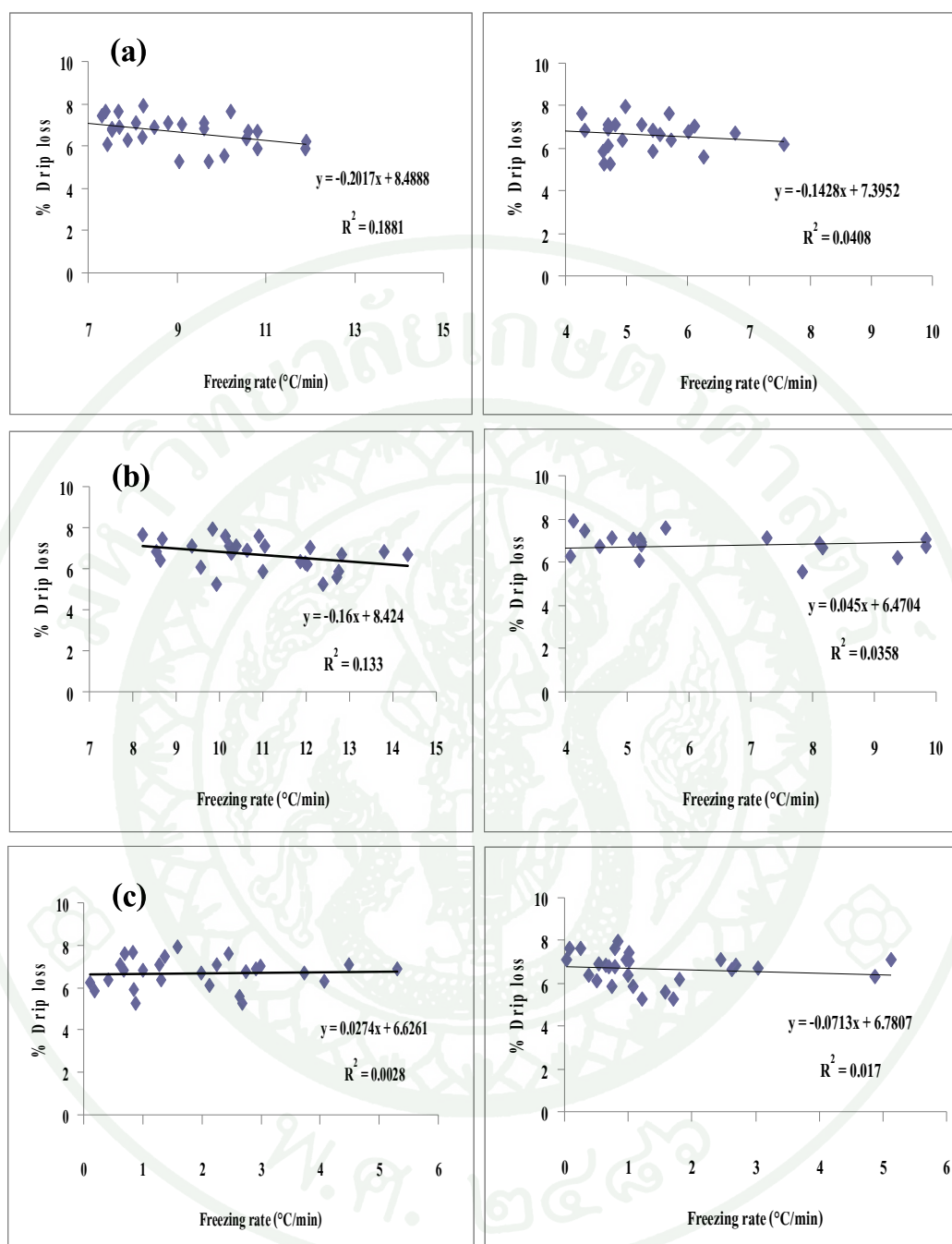
4. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแช่เยือกแข็งอาหารและการสูญเสียน้ำหนักหลังการทำละลาย

จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแช่เยือกแข็ง และ % การสูญเสียน้ำหนักหลังการทำละลาย โดยทำการวัดอัตราการแช่เยือกแข็งที่ตำแหน่งบริเวณใจกลางอาหาร (center) ผิวอาหาร (surface) และ ผลต่างระหว่างใจกลางอาหารและผิวอาหาร (center-surface) โดยมีการคิดคำนวณอัตราการแช่เยือกแข็ง 2 นิยาม คือ นิยามที่ 1 คำนวณจากเวลาเริ่มต้นจนถึงเวลาที่ -18 องศาเซลเซียส (Delgado and Da-Wen Sun, 2007; Zhu *et al.*, 2004; Chevalier *et al.*, 1999) นิยามที่ 2 คำนวณจากเวลาที่จุดเยือกแข็งแรก (T_{if}) ของอาหารจนถึงเวลาที่มีน้ำแข็งเกิดขึ้นในอาหาร 80 % ($T_{80\% ice}$) (Anon and Calvelo, 1980; Chevalier *et al.*, 2001; Ngapo *et al.*, 1999; Sanz *et al.*, 1999) ซึ่งทั้งสองนิยามนี้มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งอุณหภูมิที่เวลาจุดเยือกแข็งแรกและอุณหภูมิที่มีน้ำแข็งเกิดขึ้นในอาหาร 80 % ได้จากการคำนวณจากองค์ประกอบในอาหาร โดย T_{if} ของมะม่วงอินพีวชันและมะม่วงสุก คือ ~1.92 และ ~1.27 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และ $T_{80\% ice}$ ของมะม่วงอินพีวชันและมะม่วงสุก คือ ~12.4 และ ~7.42 องศาเซลเซียส เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแช่เยือกแข็งกับคุณภาพของอาหาร ซึ่งในที่นี้ใช้ค่า % การสูญเสียน้ำหนักหลังการทำละลายมาเป็นตัวแทนของคุณภาพของอาหารหลังการแช่เยือกแข็ง

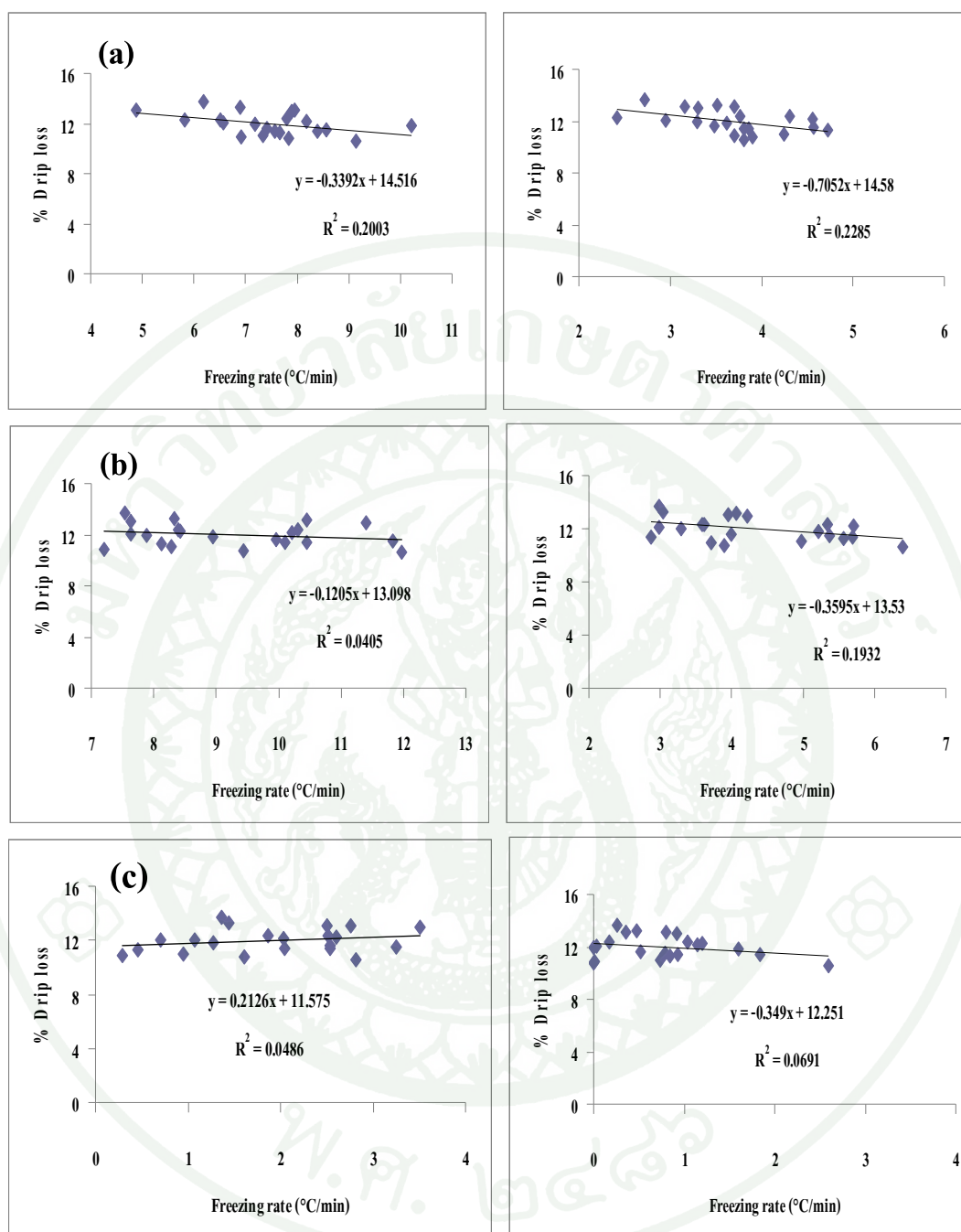
ความสัมพันธ์ดังกล่าว (อัตราการการแช่เยือกแข็งและ % การสูญเสียน้ำหนักหลังการทำละลาย) (ภาพที่ 24 และ 25) จะถูกใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาหาวิธีการคำนวณนิยามการหาอัตราการแช่เยือกแข็ง และตำแหน่งของการวัดอัตราการแช่เยือกแข็งที่เหมาะสมที่จะบ่งบอกคุณภาพอาหารได้ดีที่สุด ซึ่งจะพิจารณาจากค่า R^2 ของสมการความสัมพันธ์ดังกล่าว และได้พบว่าตำแหน่งที่ให้ค่าความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด คือ อัตราการแช่เยือกแข็งที่บริเวณใจกลางอาหารในทั้ง 2 นิยาม และของมะม่วงทั้งสองแบบ (ค่า R^2 มีค่าสูง) ทั้งนี้การที่จุดใจกลางอาหารนั้นเหมาะสมมากกว่าจุดกึ่งกลางอาหารอาจเนื่องมาจากที่บริเวณผิวอาหารนั้น มีการเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็งสูงขึ้นได้อย่างง่ายตามอัตราการถ่ายความร้อนออกจากผิวหน้าด้วยการพาความร้อนที่สูงขึ้น (เช่น ความเร็วลมสูงขึ้น) แต่อัตราการแช่เยือกแข็งที่บริเวณใจกลางอาหารนั้นไม่สามารถเพิ่มได้ในอัตราที่เร็วเท่ากับบริเวณผิว เนื่องจากค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ในอาหารมีค่าต่ำมาก แต่การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ใจกลางอาหารน่าจะมีความสัมพันธ์กับคุณภาพของอาหาร ในแง่ของการเกิดผลึกน้ำแข็งและส่งผลต่อความเสียหายของเนื้อเยื่อภายในที่เด่นชัดมากกว่า ทั้งนี้เพราะอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ใจกลางอาหารเป็นผลที่ถูกควบคุมโดยค่าการนำความร้อนซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของอาหารมากกว่า

เมื่อพิจารณาการหาอัตราการใช้เยือกแข็งอาหารจากทั้ง 2 นิยาม พบว่า นิยามที่ 1 ให้ค่าความสัมพันธ์ (R^2) ที่สูงกว่า สำหรับมะม่วงทั้งสองแบบ อาจเป็นเพราะนิยามที่ 1 นั้นสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อในทุก ๆ ช่วงของการแช่เยือกแข็งตั้งแต่เริ่มต้น (ยังไม่มีน้ำแข็งในมะม่วง) จนกระทั่งมีการสร้างผลึกน้ำแข็งและการเจริญของผลึกน้ำแข็ง ตลอดจนจบกระบวนการเยือกแข็ง ซึ่งทำให้สามารถอธิบายถึงความเสียหายของเนื้อเยื่อได้มากกว่า นิยามที่ 2 ซึ่งจะพิจารณาแค่เพียงช่วงของการสร้างผลึกน้ำแข็งเท่านั้น

Anon and Calvelo (1980) ได้ทำการศึกษาอัตราการใช้เยือกแข็งที่มีผลต่อ % การสูญเสียน้ำหนักหลังการทำละลายของเนื้อวุ้น พบว่า % การสูญเสียน้ำหนักหลังการทำละลาย มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการใช้เยือกแข็งลดลงจนถึงจุดๆหนึ่งแล้วจะมีค่าลดลงจนกระทั่งคงที่แต่ในมะม่วงนั้นไม่พบช่วงที่มีการลดลงจนคงที่ อาจเป็นเพราะในเนื้อวุ้นซึ่งเป็นเนื้อวุ้นนั้นมีโปรตีนสูง เมื่ออัตราการใช้เยือกแข็งลดลงจนถึงจุดๆหนึ่ง ผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่ทำลายเนื้อเยื่อของเนื้อสัตว์ จนทำให้โปรตีนเกิดการเสียสภาพ (Denature) ของโปรตีน ส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ที่มีโครงสร้างที่สามารถอุ้มน้ำได้ดีขึ้น ซึ่งต่างกับในมะม่วงซึ่งเป็นผลไม้ไม่มีโปรตีนต่ำ จึงอาจทำให้ไม่เกิดความสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกับเนื้อสัตว์



ภาพที่ 24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง% การสูญเสียน้ำหนักหลังการละลาย และอัตราการแช่เยือกแข็งของมะม่วงอินฟิวชัน โดย ซ้าย คือ อัตราการแช่เยือกแข็งนิยามที่ 1 ขวา คือ อัตราการแช่เยือกแข็งนิยามที่ 2 และ (a) อัตราการแช่เยือกแข็งที่ใจกลางอาหาร (b) อัตราการแช่เยือกแข็งที่ผิวอาหาร (c) ความแตกต่างระหว่างอัตราการแช่เยือกแข็งระหว่างใจกลางอาหารและผิวอาหาร



ภาพที่ 25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง% การสูญเสียน้ำหนักหลังการละลาย และอัตราการแช่เยือกแข็งของมะม่วงสุก โดย ซ้าย คือ อัตราการแช่เยือกแข็งนิยามที่ 1 ขวา คือ อัตราการแช่เยือกแข็งนิยามที่ 2 และ (a) อัตราการแช่เยือกแข็งที่ใจกลางอาหาร (b) อัตราการแช่เยือกแข็งที่ผิวอาหาร (c) ความแตกต่างระหว่างอัตราการแช่เยือกแข็งระหว่างใจกลางอาหารและผิวอาหาร

สรุปและข้อเสนอแนะ

กระบวนการแช่เยือกแบบลมเป่าปะทะไอฟัน ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการแช่เยือกแข็งแบบใหม่ มีความเหมาะสมสำหรับมะม่วงบ่ม 2 วัน (อินฟิวชัน) และมะม่วงบ่ม 3 วัน โดยคุณภาพของมะม่วง หลังการแช่เยือกแข็งและการทำลายพบว่า มีความใกล้เคียงกับการแช่เยือกแข็งด้วยไครโอเจนิก ซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าวนี้จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับอาหารชนิดอื่น โดยเฉพาะผลไม้สุกที่มี ลักษณะเนื้อที่มีความใกล้เคียงกับมะม่วง เช่น มะละกอสุก เป็นต้น

มะม่วงที่เหมาะสมสำหรับการแช่เยือกแข็งนั้น สามารถใช้มะม่วงบ่ม 2 วัน (อินฟิวชัน) และมะม่วงบ่ม 3 วัน ได้โดยทั้งสองแบบจะให้ลักษณะเนื้อสัมผัสหลังทำลายที่ใกล้เคียงกัน แต่จะมีความโดดเด่นในแต่ละด้านที่แตกต่างกัน โดยมะม่วงบ่ม 3 วันนั้น จะให้ลักษณะของกลิ่นและรสชาติที่เหนือกว่า ส่วนมะม่วงบ่ม 2 วัน (อินฟิวชัน) กลิ่นและรสชาติดีพอควร แต่จะให้ลักษณะสี มีการสูญเสียน้ำหนักหลังการละลายที่ดี และใช้เวลาในการแช่เยือกแข็งที่สั้นกว่าและยังประหยัด เวลาในการบ่มอีกด้วย

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมศุลกากร. แหล่งที่มา: agriqua.doae.go.th/export/091252/mango_export.doc, 27 กันยายน 2553.

เจริญ ขุนพรหม. 2550. วิธีการปมมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ทะวายเบอร์ 4 ที่เหมาะสมในระดับการค้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ดวงตรา กสานติกุล. 2526. การศึกษาการเจริญเติบโต การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีและดัชนีการเก็บเกี่ยวของผลมะม่วง (*Mangifera indica* L.) พันธุ์น้ำดอกไม้. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธีระ วัฒนศิริเวช. 2545. การศึกษาชนิดและปริมาณสารหอมระเหย น้ำตาล และกรดบางชนิดในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่มีระยะการสุกและสภาวะการสุกแตกต่างกัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ธีราพร ไชยวรรณ. 2536. การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ-เคมีระหว่างการสุกของมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ หนึ่งกลางวันและแรด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

กรมวิชาการเกษตร. 2548. วารสารผลไม้. แหล่งที่มา:

http://ndoe.doae.go.th/news/news_082.html, 27 พฤศจิกายน 2550.

สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. 2550. มติชน ฉบับวันที่ 08/01/50.

แหล่งที่มา: http://www.acfs.go.th/news_detail.php?ntype=09&id=47, 27 พฤศจิกายน 2550.

รัชฎา ตั้งวงศ์ไชย และ นัฏฐรี ศรีบูรณสร. 2548. ผลไม้ตัดแต่งและการปรับปรุงคุณภาพโดยใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์. ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

วัฒนา สวาศิปปิตี. 2541. การปลูกมะม่วง. ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ. สำนักส่งเสริมและฝึกอบรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม.
แหล่งที่มา: <http://www.doae.go.th/library/html/detail/mango1/#mango>, 30 พฤศจิกายน 2550.

วิจิตร วังใน. 2529. มะม่วง. บริษัทศรีสยามการพิมพ์จำกัด, กรุงเทพฯ ฯ.

วิไล รังสาดทอง. 2546. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ ฯ.
หน้า 390 – 421.

ศรินทรา บุญสำเร็จ. 2544. ผลของกระบวนการแช่เยือกแข็งต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon*) ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นและแบบไครโอจินิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศุติพร ศรีพัฒนพิพัฒน์. 2540. การแช่เยือกแข็งชิ้นมะม่วงน้ำดอกไม้และโชคอนันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สงวนศรี เจริญเหรียญ. 2536. การแช่เย็นและการแช่เยือกแข็งผลผลิตการเกษตร. สถาบันเทคโนโลยีการเกษตรแม่โจ้, เชียงใหม่.

สมพร เกษแก้ว. 2546. “เอนไซม์และบทบาทของเอนไซม์ในอาหาร” เอกสารประกอบการสอนวิชาชีวเคมีของอาหาร. ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

สายชล เกตุษา. 2528. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวของผักและผลไม้. โรงพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ, นครปฐม.

- สาขชล เกตุษา. 2533. การเก็บเกี่ยวและวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว. ใน คณาจารย์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. การทำสวนมะม่วง. โครงการคู่มือประกอบอาชีพสำหรับประชาชน ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ สำนักส่งเสริมและฝึกอบรมมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุขสานต์ อริยรังสฤษฎ์. 2550. **เมืองไม้ผล**. บริษัทเมืองเกษตร แมกกาซีน จำกัด, กรุงเทพฯ ๗. 6(71-72): 95 - 100.
- Ajila, C.M., S.G. Bhat and U.J.S. Prasada Rao. 2007. Valuable components of raw and ripe peels from two Indian mango varieties. **Food Chem.** 102(4): 1006-1011.
- Aleksandar, J., G. Juliana, L. Ljubinko and Z. Zoltan. 2007. Osmotic dehydration of sugar beet in combined aqueous solutions of sucrose and sodium chloride. **J Food Eng.** 76: 47-51.
- Anderson, B.A. and R.P. Singh. 2006. Effective heat transfer coefficient measurement during air impingement thawing using an inverse method. **INT. J. Refri.** 29: 281-293.
- Anon, M.C. and A. Calvelo. 1980. Freezing rate effects on the drip loss of frozen beef. **Meat Science.** 4: 1-14.
- Arogba, S.S. 2000. Mango (*Mangifera indica*) Kernel: Chromatographic Analysis of the Tannin, and Stability Study of the Associated Polyphenol Oxidase Activity. **J Food Compos Anal.** 13(2): 149-156.
- Bomben, J.L., C.J. King and T.L. Hayes. 1983. Cold-stage scanning electron microscope measurement of ice morphology in apple tissue as a function of freezing rate. **Cryobiology** 20(5): 574-586.
- Boonsupthip, W. 2005. **Composition-based model for prediction of frozen muscle food quality**. Rutgers, The State University of New Jersey.

- Boonsupthip, W. and D.R. Heldman. 2005. **Prediction of frozen water fraction during food freezing based on product composition.** 58D-8. The 2005-IFT Annual Meeting.
- _____ and T-C. Lee. 2003. Ice crystal kinetics. *In*: Heldman DR, ed. **The Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering (EAFE)** (pp. 509-516). Marcel Dekker.
- Borquez, R. 2003. Stability of *n*-3 fatty acids in fish particles during processing by impingement jet. **J Food Eng.** 56(2-3): 245-247.
- Buggenhout, S.V., I. Messagie, V. Maes, T. Duvetter, A. Van Loey and M. Hendrickx. 2006. Minimizing texture loss of frozen strawberries: Effect of infusion with pectinmethylesterase and calcium combined with different freezing conditions and effect of subsequent storage/thawing conditions. **European Food Research and Technology**, 223(3), 395–404.
- Burwash, W., W. Finlay and E. Matida. 2006. Deposition of particles by a confined impinging jet onto a flat surface at $Re = 10^4$. **Aerosol Science and Technology**, 40, 147-156.
- Carbonell, S., J.C. Oliveira and A.L. Kelly. 2006. Effect of pretreatments and freezing rate on the firmness of potato tissue after a freeze-thaw cycle. **INT. J. Food Sci and Tech.** 41: 757-767.
- Castello, M.L., M. Igual., P.J Fito and A. Chiralt. 2009. Influence of osmotic dehydration on texture, respiration and microbial stability of apple slices (Var. Granny Smith). **J Food Eng.** 91: 1–9.

- Charoenrein, S., M. Goddard and D.S. Reid. 1991. Effect of solute on the nucleation and propagation of ice. *In* **Water Relationships in Foods: Advances in the 1980's and Trends for the 1990's** (pp. 191-198) H. Levine and L. Slade (Eds.), Plenum Press, New York.
- Chevalier, D., A. Le Bail and J. M. Chourot. 1999. High pressure thawing of fish (Whiting): Influence of the process parameters on drip losses. **Lebensm.-Wiss. u.-Technol.** 32: 25-31.
- Chevalier, D., A. Sequeira-Munoz, A. Le Bail, B.K. Simpson and M. Ghoul. 2001. Effect of freezing conditions and storage on ice crystal and drip volume in turbot (*Scophthalmus maximus*)/ Evaluation of pressure shift freezing vs. air-blast freezing. **Innovative Food Science & Emerging Technologies.** 1: 193-201.
- Chiralt, A., N. Martínez-Navarrete, J. Martínez-Monzó, P. Talens, G. Moraga, A. Ayala and P. Fito. 2001. Changes in mechanical properties throughout osmotic processes: Cryoprotectant effect. **J Food Eng.** 49(2-3): 129-135.
- Dalla Rosa, M. and F. Giroux. 2001. Osmotic treatment (OT) and problems related to the solution management. **J Food Eng.** 49: 223-236.
- Delgado, A.E. and Da-Wen Sun. 2007. Influence of surface water activity on freezing/thawing times and weight loss prediction. **J Food Eng.** 83: 23-30.
- Dit-udom-po, S. and C. Pittarate. 2007. Mass Transfer During Osmotic Dehydration of Tomato Using Sucrose, Sorbitol and Maltitol. **J Agr Sci.** 38(6) (Supl.): 115-118.
- Donhowe, D.P., R.W. Hartel, R.L. Bradley and Jr. 1991. Determination of ice crystal size distributions in frozen desserts. **J Dairy Sci.** 74: 3334-3344.

- Erba, M.L., E. Forni, A. Colonello and R. Giangiaco. 1994. Influence of sugar composition and air dehydration levels on the chemical-physical characteristics of osmodehydrofrozen fruit. **Food Chem.** 50: 69-73.
- Fito, P. 1994. Modelling of vacuum osmotic dehydration of food. **J Food Eng.** 22: 313–328.
- Fito, P., A. Chiralt, . Martinez-Monzo, and J.M. Barat. 2000. Vacuum impregnation in fruit processing. *In: J.E. Lozano, C. Anon, E. Parada-Arias and G.V. Barbosa-Canovas, Editors, Trends in food engineering* (pp. 149–164). Technomic Publishing Company, Pennsylvania.
- Forni, E., D. Torregiani, G. Crivelli, A. Mastrelle, G. Bertolo and F. Santelli. 1990. Influence of osmosis time on the quality of dehydrofrozen kiwi fruit. **Acta Hort.** 282: 425-434.
- _____, _____, A. Sormani and S. Scalise. 1997. The influence of sugar composition on the colour stability of osmodehydrofrozen intermediate moisture apricots. **Food Res Int.** 30(2): 87-94.
- Kumchoo, W. and W. Yuenyongputtakal. 2007. Osmotic Pre-treatment Effect on the Quality of Frozen Muskmelon (*Cucumis melo* Linn.). **J Agr Sci.** 38(6) (Suppl.), 111-114.
- Levine, H. and L. Slade. 1990. Cryostabilization technology: Thermoanalytical evaluation of food ingredients and systems. *In V.R.Harwalkar,&C.Y.Ma(Eds.), Thermal analysis of foods* (pp. 221–305). London: Elsevier.
- Li, B. and D.W. Sun. 2002. Novel methods for rapid freezing and thawing foods-A review. **J. Food Eng.** 54: 175-182.

- Londahl, G., S. Goransson, S. Sundsten, A. Andersson and E. Tornberg. 1995. Quality differences in fast freezing. **Proceedings of the Nineteenth International Congress of Refrigeration**, Le Hague, Netherlands (Vol. I) (pp. 197–204).
- Luanda, G.M., M.P. Manoel and T.F. José. 2009. Rehydration characteristics of freeze-dried tropical fruits. **LTW-Food Science and Technology** 42 (7): 1232-1237.
- Martinez-Monzo, J., N. Martinez-Navarrete, A. Chiralt and P. Fito. 1998. Mechanical and structural change in apple (var. Granny Smith) due to vacuum impregnation with cryoprotectants. **J. Food Sci.** 63: 499–503.
- Mújica-Paz H, A. Valdez-Fragoso, A.López-Malo, E. Palou and J. Welti-Chanes. 2003a. Impregnation and osmotic dehydration of some fruits: effect of the vacuum pressure and syrup concentration. **J Food Eng.** 57: 305-314.
- _____, _____, _____, _____ and _____. 2003b. Impregnation properties of some fruit at vacuum pressure. **J Food Eng.** 56: 307-314.
- Ngapo, T.M., I.H. Babare, J. Reynolds and R.F. Mawson. 1999. Freezing and thawing rate effects on drip loss from samples of pork. **Meat Science.** 53: 149-158.
- Otero, L., M. Martino, N. Zaritzky, M. Solas and P.D. Sanz. 2000. Preservation of microstructure in peach and mango during high-pressure-shift freezing. **J. Food Sci.** 65(3): 466-470.
- Pretel, M.T., M.A. Botella, A. Amorós, P.J. Zapata and M. Serrano. 2007. Optimization of vacuum infusion and incubation time for enzymatic peeling of ‘Thomson’ and ‘Mollar’ oranges. **LTW-Food Science and Technology** 40: 12-20.

- Roe, B. and J.H. Bruemmer. 1981. Changes in pectic substances and enzymes during ripening and storage of 'Keitt' mangos. **J Food Sci.** 46: 186-189.
- Russell, L.R. and E.D. John. 1987. Evaluating panelist bias from grapefruit juice hedonic scores. **In Proceedings of the Florida State Horticultural Society** 100: 53-55.
- Salvadori, V.O. and R.H. Mascheroni. 2002. Analysis of impingement freezers performance. **J. Food Eng.** 54: 133-140.
- Sarkar, A., N. Nitin, M.V. Karwe and R.P. Singh. 2004. Fluid flow and heat transfer in air jet impingement in food processing. **J Food Sci.** 69: 113-122.
- _____ and R.P. Singh. 2004. Air impingement technology for food Processing: visualization studies. **Lebensm.-Wiss. u.-Technol.** 37: 873-879.
- Selvaraj, Y., R. Kumar and D.K. Pal. 1989. Changes in sugars, organic acids, lipid constituents and aroma characteristics of ripening mango (*Manifera indica*.L.) fruit. **J. Food Sci and Tech.** 26(6): 308 – 313.
- Soto, V. and R. Borquez. 2001. Impingement jet freezing of biomaterials. **Food Contr.** 12: 515-522.
- Souci S.W., W. Fachmann and H. Kraut. 1994. **Food Composition and Nutrition Tables** (6th Edition). CRC Press, London.
- Subedi, P.P., K.B. Walsh and G. Owens. 2007. Prediction of mango eating quality at harvest using short-wave near infrared spectrometry. **Postharvest Biol Tec.** 43: 326–334.
- Sun D.W. and B. Li. 2003. Microstructural change of potato tissues frozen by ultrasound-assisted immersion freezing. **J Food Eng.** 57(4): 337-345.

- Sanz, P.D., C. de Elvira, M. Martino, N. Zaritzky, L. Otero and J.A. Carrasco. 1999. Freezing rate simulation as an aid to reducing crystallization damage in foods. **Meat Science**. 52(3): 275-278.
- Torreggiani, D. 1993. Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. **Food Res Int.** 26: 59-68.
- _____, E. Forni and A. Rizzolo. 1987. Osmotic dehydration of fruits, Part II: Influence of the osmotic time on the stability of processed cherries. **J Food Process Pres.** 12: 27-44.
- Varayanond, W., S. Boonbumrung, H. Tamura, T. Yoshizawa and Y. Matsubara. 2001. Osmotic dehydration of mango: Influence of trehalose and sucrose contents on the product quality. **Tech. Bull. Fac. Agr.** Kagawa University, 53, 43-49.
- Vergara-Valencia, N., E. Granados-Pérez, E. Agama-Acevedo, J. Tovar, J. Ruales and L. A. Bello-Pérez. 2007. Fibre concentrate from mango fruit: Characterization, associated antioxidant capacity and application as a bakery product ingredient. **LTW-Food Science and Technology** 40(4): 722-729.
- Yuenyongputtakal, W. 2006. **Osmotic pre-treatment in fruit product development from persimmons**. Ph.D. Thesis, Kasetsart University.
- Zhao, Y. and J. Xie. 2004. Practical applications of vacuum impregnation in fruit and vegetable processing. **Trends Food Sci Tech.** 15: 434-451.
- Zhu, S., H.S. Ramaswamy and B.K. Simpson. 2004. Effect of high-pressure versus conventional thawing on color, drip loss and texture of Atlantic salmon frozen by different methods. **Lebensm.-Wiss. u.-Technol.** 37: 291-299.





การทดสอบความชอบ/ การยอมรับ

ผลิตภัณฑ์ : มะม่วงสุก/มะม่วงสุกแช่เยือกแข็ง วันที่ _____
 ผู้ทดสอบ _____ อายุ _____ ปี

คำแนะนำ : กรุณาชิมตัวอย่างจากซ้ายไปขวาแล้วให้คะแนนความชอบของตัวอย่างโดยให้คะแนนตามคำอธิบายคะแนนความชอบ และกรุณาบ้วนปากก่อนชิมตัวอย่าง

สเกลความชอบ

- 1 = ไม่ชอบมากที่สุด 6 = ชอบเล็กน้อย
 2 = ไม่ชอบมาก 7 = ชอบปานกลาง
 3 = ไม่ชอบปานกลาง 8 = ชอบมาก
 4 = ไม่ชอบเล็กน้อย 9 = ชอบมากที่สุด
 5 = เฉย ๆ

คุณลักษณะ	คะแนนความชอบ							
	—	—	—	—	—	—	—	—
สี								
กลิ่นมะม่วง								
รสหวาน								
ลักษณะเนื้อสัมผัส								
ความชอบโดยรวม								

ข้อเสนอแนะ _____



ภาคผนวก ข

การคำนวณหาจุดเยือกแข็งเริ่มต้น (T_{Fi}) และอุณหภูมิที่เกิดปริมาณน้ำแข็งในมะม่วง 80% ($T_{80\%ice}$)

การคำนวณหาจุดเยือกแข็งเริ่มต้น (T_{Fi}) และอุณหภูมิที่เกิดปริมาณน้ำแข็งในมะม่วง 80% ($T_{80\%ice}$)

- T_{Fi} และ $T_{80\%ice}$ ของมะม่วงจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบในมะม่วง

- ตัวอย่างการคำนวณหา T_{Fi} และ $T_{80\%ice}$ ของมะม่วงที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) = 21.5 องศาบริกซ์

1) หาค่าประกอบของมะม่วงสุก

Composition	% wt.	Xi	MW	ni
Water	80.5	0.7718	18.02	
Protein	0.4	0.0038	50,000	0.000008
Carbohydrate	21.5	0.2061	50,000	0.000430
Lipid	0.2	0.0019	50,000	
Fiber	1.7	0.01630	50,000	0.000034
Ash		0.0000	50,000	
Total	104.3	1		
Mono-sac	7.17		180	0.039833
Di-sac	14.33		342	0.041901
Ascorbic acid	0.0278		176.1	0.000158
Citric acid	0.2		192.1	0.001041
Malic acid	0.00007		134.1	0.000001
Sodium	0.003		23	0.000130
Potassium	0.168		39	0.004308
Magnesium	0.018		24.3	0.000741
Calcium	0.01		40.08	0.000250
Phosphorus	0.01		30.97	0.000323
Bound Water (b=0.25)	5.9500		ns=Σni	0.089156

* โดยนำตาลในมะม่วงประกอบไปด้วย ซูโครส:กลูโคส:ฟรุกโตส ในอัตรา 11:2:3.5 (Souci, 1994)

2) หาปริมาณน้ำที่ถูกตรึง

ด้วยแบบจำลองของ Duckworth (1971) โดยให้ค่าคงที่ b สำหรับผักและผลไม้ เท่ากับ 0.25

$$X_B = bX_S$$

ค่า X_S คืออัตราส่วนมวลของของแข็งต่อมวลอาหาร คำนวณได้จากการแทนค่าองค์ประกอบของมะม่วงลงใน สมการ

$$\begin{aligned} X_S &= X_{Protein} + X_{Carbohydrate} + X_{Lipid} + X_{Mineral} + X_{Fiber} \\ &= (m_p + m_c + m_L + m_M + m_F) / (m_W + m_p + m_c + m_L + m_M + m_F) \\ &= (0.4 + 21.5 + 0.2 + 0 + 1.7) / (80.5 + 0.4 + 21.5 + 0.2 + 0 + 1.7) \\ &= 0.23 \end{aligned}$$

ฉะนั้นค่าอัตราส่วนมวลของน้ำที่ถูกตรึง เท่ากับ

$$\begin{aligned} X_{B=0.25} &= 0.25 * 0.23 \\ &= 0.057 \end{aligned}$$

ฉะนั้นมวลของน้ำที่ถูกตรึง เท่ากับ

$$\begin{aligned} m_B &= X_B m_{Total} = X_B (m_W + m_p + m_c + m_L + m_M + m_F) \\ m_{B=0.25} &= 0.057 * 104.3 = 5.95 \end{aligned}$$

3) หาจุดเยือกแข็งเริ่มต้น

โดยใช้แบบจำลองที่ใช้มวลโมเลกุลสารอาหารที่แท้จริง (Boonsupthip and Heldman, 2005; Boonsupthip, 2005)

$$\frac{1}{T_{Fi}} = \frac{1}{T_0} - \frac{R}{\lambda M_w} \ln \left[\frac{(m_w - m_B) / M_w}{\frac{(m_w - m_B)}{M_w} + (\sum_i n_i)} \right]$$

- คำนวณหา $\sum n_i = n_s$

โดย S คือ สารอาหารที่เป็นของแข็งในมะม่วงที่มีความเข้มข้นเป็น โมเลลิตี (Molality) ตั้งแต่ $50 \mu\text{mol}/100\text{g}$ อาหาร ขึ้นไป สารอาหารที่มีความเข้มข้นต่ำกว่านี้จะไม่นำมาคิดในการคำนวณ เพราะถือว่าสารเหล่านี้มีผลกระทบต่อการลดลงของจุดเยือกแข็งของน้ำในมะม่วงน้อยมาก (ไขมันจะไม่ถูกนำมาคิด เพราะเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ ส่วนคาร์โบไฮเดรต สำหรับพืชและสัตว์จะประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและคู่ เป็นส่วนใหญ่ คาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยน้ำตาลที่มีมากกว่า 2 โมเลกุลจะมีอยู่จำนวนน้อยมาก ส่วนนี้จะถูกคิดแยกเป็นสารเกลือแร่ที่สำคัญชนิดต่างๆ เช่น Ascorbic acid, Citric and Isocitric acid และ Malic acid เป็นต้น)

- สมมติให้มวลโมเลกุลของสารโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไฟเบอร์ มีค่าเท่ากับ $50,000 \text{ Da}$

$$n_s = \frac{m_s}{M_s} = \frac{m_P}{M_P} + \frac{m_C}{M_C} + \frac{m_F}{M_F} + \frac{m_{Mono}}{M_{Mono}} + \frac{m_{Di}}{M_{Di}} + \frac{m_{Asc}}{M_{Asc}} + \frac{m_{Cit}}{M_{Cit}} + \frac{m_{Na}}{M_{Na}} + \frac{m_K}{M_K} + \frac{m_{Ca}}{M_{Ca}} + \frac{m_F}{M_F}$$

$$n_s = (0.4/50000) + (21.5/50000) + (1.7/50000) + (7.17/180) + (14.33/342) + (0.0278/176.1)$$

$$+ (0.2/192.1) + (0.003/23) + (0.168/39) + (0.01/40.08) + (0.01/30.97)$$

$$= 0.089156$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการ T_{Fi}

$$\frac{1}{T_{Fi}} = \frac{1}{273.15} - \frac{8.314}{(18.02 * 333.64)} \ln \left[\frac{(0.77 - 0.057) / (18.02)}{\frac{(0.77 - 0.057)}{18.02} + (0.089156)} \right]$$

$$T_{Fi} = 271 \text{ K}$$

$$= -2.2 ^\circ\text{C}$$

- 4) หาอัตราส่วนน้ำที่ยังไม่แข็งตัวทั้งหมดและอัตราส่วนน้ำแข็งที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ปริมาณน้ำทั้งหมดที่ยังไม่แข็งตัวทั้งหมดต่อมวลอาหารจะคำนวณได้จาก

$$X_{U,Total}(T_F) = \frac{1}{m_{Total}} \left[m_{B=0.25} + M_W \left(\frac{n_s}{\left\{ 1/\exp \left[\frac{\lambda M_W}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_F} \right) \right] \right\} - 1} \right) \right]$$

$$X_{U,Total}(T_F) = \frac{1}{104.3} \left[5.95 + 18.02 \left(\frac{0.089156}{\left\{ 1/\exp \left[\frac{333.64(18.02)}{8.314} \left(\frac{1}{273.15} - \frac{1}{T_F} \right) \right] \right\} - 1} \right) \right]$$

เมื่อแทนค่าอุณหภูมิจุดเยือกแข็ง T_F (K) ลงในสมการข้างต้นจะได้ค่า $X_{U,Total}(T_F)$ และค่าอัตราส่วนน้ำแข็งสามารถคำนวณได้โดย

$$X_I(T_F) = X_W - X_{U,Total}(T_F)$$

ผลการคำนวณแสดงในตาราง ดังนี้

ตารางผนวกที่ ข1 แสดงอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณหา T_{Fi} และ $T_{80\%ice}$

Temp.(K)	Temp. (°C)	XU	XI
293.15	20	0.7718	0.0000
283.15	10	0.7718	0.0000
273.15	0	0.7718	0.0000
272.65	-0.5	0.7718	0.0000
271.15	-2	0.7718	0.0000
270.95	-2.2	0.7660	0.0059
268.10	-5.05	0.3583	0.4135
263.15	-10	0.2026	0.5692
258.80	-14.35	0.1545	0.6173
255.05	-18.1	0.1316	0.6402
252.95	-20.2	0.1225	0.6493

$$T_{Fi} = -2.2$$

$$T_{80\%ice} = -14.35$$

- ปริมาณน้ำแข็ง 80% ในอาหารหาได้จาก $0.8 * X_w = 0.8 * 0.7718 = 0.6174$



ภาคผนวก ค
ข้อมูลประกอบการทดลอง

ตารางผนวกที่ ค1 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของมะม่วงบ่ม 0-4 วัน

Time (day)	L*	a*	b*	°Brix	Force (g)	pH	Flavor	Sweetness
0	84.72 ^a ± 1.76	-1.08 ^d ± 2.19	23.66 ^c ± 1.09	9.15 ^c ± 0.21	29,001.17 ^a ± 314	3.0 ^b ± 0.03	1.23 ^c ± 0.57	1.30 ^c ± 0.87
1	79.71 ^{ab} ± 3.28	3.89 ^c ± 2.86	44.47 ^b ± 5.40	12.50 ^b ± 0.71	5,461.42 ^b ± 193	3.1 ^b ± 0.07	2.30 ^c ± 0.85	2.13 ^c ± 0.85
2	75.40 ^b ± 2.37	10.74 ^b ± 1.37	57.05 ^a ± 0.28	15.00 ^b ± 0.00	2,580.76 ^c ± 256	4.0 ^a ± 0.02	5.46 ^b ± 0.46	5.74 ^b ± 0.57
3	74.28 ^b ± 1.24	12.60 ^{ab} ± 2.35	57.74 ^a ± 4.88	16.75 ^{ab} ± 0.35	2,027.10 ^c ± 189	4.5 ^a ± 0.03	7.93 ^a ± 0.86	8.63 ^a ± 0.68
4	70.75 ^b ± 0.99	15.17 ^a ± 1.74	60.76 ^a ± 1.59	19.40 ^a ± 0.57	1,681.34 ^d ± 226	4.5 ^a ± 0.04	8.13 ^a ± 0.69	8.76 ^a ± 0.95

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวดิ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางผนวกที่ ค2 ผลของเวลาที่ใช้ในเทคนิคการอินฟิวชันและเทคนิคการแพร่แบบธรรมชาติ

Condition		L*	a*	b*	°Brix	Force (g)
	FR	60.36 ^b ± 0.06	15.08 ^a ± 1.32	53.94 ^a ± 0.64	20.00 ^a ± 0.85	1,257.95 ^c ± 51.07
	PR	68.32 ^a ± 1.43	11.40 ^a ± 0.10	51.17 ^a ± 2.82	13.60 ^b ± 1.13	2,592.00 ^a ± 133.11
NMD	10	56.52 ^b ± 0.76	13.78 ^a ± 1.29	37.13 ^b ± 1.39	16.60 ^b ± 0.85	2,199.23 ^b ± 34.33
	20	57.85 ^b ± 1.22	11.48 ^a ± 1.34	36.48 ^b ± 1.65	15.70 ^b ± 0.42	2,271.01 ^b ± 12.55
	30	57.58 ^b ± 1.29	12.67 ^a ± 1.51	37.17 ^b ± 1.82	17.75 ^b ± 0.35	2,119.75 ^b ± 41.47
	40	58.78 ^b ± 1.56	11.37 ^a ± 1.33	26.73 ^c ± 3.35	18.24 ^a ± 0.28	2,199.40 ^b ± 47.30
	50	60.69 ^b ± 2.78	9.12 ^b ± 0.80	21.39 ^c ± 1.59	19.44 ^a ± 1.98	2,198.64 ^b ± 31.01
	60	57.71 ^b ± 1.58	9.20 ^b ± 1.60	19.62 ^c ± 0.86	19.74 ^a ± 21.2	2,175.57 ^b ± 21.30
VI	10	64.86 ^a ± 2.87	8.35 ^b ± 0.48	55.65 ^a ± 4.58	19.60 ^a ± 1.03	2,467.45 ^a ± 278.11
	20	61.37 ^b ± 6.00	7.03 ^b ± 3.87	51.78 ^a ± 4.55	18.50 ^a ± 1.24	1,151.67 ^c ± 3.63
	30	63.12 ^{ab} ± 6.58	7.09 ^b ± 2.13	54.70 ^a ± 1.79	19.00 ^a ± 0.07	1,218.87 ^c ± 154.75
	40	63.07 ^{ab} ± 5.49	5.86 ^b ± 2.99	49.82 ^a ± 5.79	18.60 ^a ± 0.85	1,284.14 ^c ± 125.17
	50	60.45 ^b ± 1.91	6.65 ^b ± 0.50	53.12 ^a ± 2.12	19.10 ^a ± 1.27	1,471.55 ^c ± 46.06
	60	62.66 ^b ± 2.69	7.26 ^b ± 1.84	52.77 ^a ± 1.83	19.90 ^a ± 0.04	1,331.38 ^c ± 87.00

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

หมายเหตุ FR คือ Fully Ripe, PR คือ Partially Ripe

NMD คือ Natural Mass Diffusion

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวดิ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางผนวกที่ ๓ ผลของความดันสุญญากาศที่ใช้ในเทคนิคการอินฟิวชันภายใต้สภาวะสุญญากาศ ที่เวลา 10 นาที

Condition	L*	a*	b*	°Brix	Force (g)
FR	60.36 ^b ± 0.06	15.08 ^a ± 1.32	51.17 ^a ± 2.82	20.00 ^a ± 0.85	1,257.95 ^d ± 78.53
PR	68.32 ^a ± 1.43	11.40 ^b ± 0.10	53.94 ^a ± 0.64	13.60 ^b ± 1.13	2,580.00 ^a ± 139.06
74.66 kPa	56.30 ^b ± 1.38	12.70 ^b ± 0.91	32.79 ^b ± 1.73	20.30 ^a ± 0.42	2,218.71 ^b ± 36.97
48.00 kPa	54.97 ^b ± 2.15	12.13 ^b ± 1.69	33.01 ^b ± 2.14	19.30 ^a ± 0.99	2,094.64 ^c ± 34.01
21.33 kPa	54.79 ^b ± 1.80	11.88 ^b ± 0.59	32.95 ^b ± 1.97	20.00 ^a ± 1.41	2,056.60 ^c ± 19.91

หมายเหตุ FR คือ Fully ripe, PR คือ Partially ripe

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวดิ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางผนวกที่ ค4 ผลของอัตราส่วนของน้ำมะม่วงที่ใช้ในเทคนิคการอินฟิวชันภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ความดัน 74.66 kPa เวลา 10 นาที

Condition	L*	a*	b*	°Brix	Force (g)
FR	62.83 ^a ± 3.92	7.86 ^b ± 0.57	53.46 ^a ± 7.94	20.00 ^a ± 0.85	1,257.95 ^c ± 78.53
PR	64.70 ^a ± 3.22	14.70 ^a ± 1.48	56.22 ^a ± 3.28	13.80 ^b ± 0.00	2,656.00 ^a ± 45.95
0	52.41 ^b ± 1.34	6.96 ^b ± 0.64	39.25 ^{bc} ± 2.79	22.75 ^a ± 1.06	2,327.80 ^b ± 54.17
5	52.15 ^b ± 1.35	6.57 ^b ± 1.86	34.84 ^c ± 8.18	23.50 ^a ± 0.71	2,302.92 ^b ± 58.49
10	50.91 ^b ± 2.43	8.83 ^b ± 2.13	40.79 ^b ± 4.33	23.00 ^a ± 0.00	2,334.14 ^b ± 40.97
15	52.15 ^b ± 2.05	8.14 ^b ± 0.09	41.80 ^b ± 4.49	22.75 ^a ± 0.35	2,281.09 ^b ± 35.92
20	52.63 ^b ± 0.13	7.86 ^b ± 0.05	41.32 ^b ± 0.49	24.00 ^a ± 0.00	2,352.39 ^b ± 77.67

หมายเหตุ FR คือ Fully ripe, PR คือ Partially ripe

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวดิ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางผนวกที่ ค5 ลักษณะของมะม่วงอินพีวชั้นที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบต่างๆ และการทำละลาย

Condition	L*	a* ^{ns}	b*	° Brix	Force (g) ^{ns}	%Drip loss	Fz. at Center ^{ns}	Fz. at Surface ^{ns}
Fresh	70.07 ^a ± 7.60	10.57 ± 2.65	50.43 ^a ± 5.12	15.45 ^b ± 0.49				
Citric/Ascorbic								
CaCl ₂	67.03 ^{ab} ± 12.22	10.94 ± 1.84	45.44 ^b ± 10.77	14.98 ^b ± 1.03				
VI	63.89 ^b ± 8.39	9.10 ± 1.91	41.32 ^b ± 3.28	19.50 ^a ± 1.36				
Air-blast	62.70 ^b ± 5.97	9.37 ± 0.88	45.36 ^b ± 0.07	19.43 ^a ± 1.11	432.45 ± 24.70	11.83 ^a ± 4.77	5.72 ± 1.21	6.09 ± 1.41
Jet impingement	63.43 ^b ± 5.20	9.02 ± 0.02	44.76 ^b ± 4.90	19.51 ^a ± 1.56	394.16 ± 3.07	8.99 ^b ± 2.10	6.56 ± 0.56	7.19 ± 2.54
Cryogenic	64.35 ^b ± 7.28	9.73 ± 0.35	45.41 ^b ± 0.68	19.32 ^a ± 1.45	405.67 ± 33.43	8.64 ^b ± 4.65	4.82 ± 0.63	5.78 ± 1.56

หมายเหตุ Fz. at Center คือ อัตราการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิใจกลางชิ้นมะม่วง, Fz. at Surface คือ อัตราการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิผิวชิ้นมะม่วง

^{ns} คือค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางผนวกที่ ๑๖ ลักษณะของมะม่วงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบต่างๆ และการทำละลาย

Condition	L*	a* ^{ns}	b*	° Brix ^{ns}	Force (g) ^{ns}	%Drip loss ^{ns}	Fz. at Center ^{ns}	Fz. at Surface ^{ns}
Fresh	69.42 ^a ± 4.36	8.68 ± 6.08	49.94 ^a ± 5.88	16.63 ± 0.18				
Citric/Ascorbic								
CaCl ₂	63.41 ^b ± 7.45	8.64 ± 6.70	43.03 ^b ± 11.31	15.88 ± 0.18				
Air-blast	58.34 ^b ± 7.90	8.68 ± 7.01	41.99 ^b ± 0.51	15.55 ± 0.78	358.64 ± 22.88	13.08 ± 3.33	5.01 ± 0.87	6.48 ± 1.00
Jet impingement	58.13 ^b ± 9.84	8.48 ± 6.59	40.76 ^b ± 3.27	15.48 ± 0.32	350.67 ± 8.14	11.28 ± 0.27	7.89 ± 1.57	8.40 ± 2.14
Cryogenic	60.33 ^b ± 5.49	9.23 ± 6.62	41.78 ^b ± 3.41	15.10 ± 0.14	279.00 ± 26.97	10.90 ± 1.24	6.94 ± 0.37	6.64 ± 0.30

หมายเหตุ Fz. at Center คือ อัตราการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิใจกลางชิ้นมะม่วง, Fz. at Surface คือ อัตราการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิผิวชิ้นมะม่วง

^{ns} คือค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางผนวกที่ ๗ ลักษณะของมะม่วงอินพีวชันที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบเป่าปะทะไอน้ำ โดยใช้หัวเป่าลมหัวบนและการทำละลาย

Condition	L*	a*	b*	° Brix	% Force loss	% Drip loss ^{ns}	Fz. at Center	Fz. at Surface
Fresh	70.96 ^a ± 2.51	7.54 ^b ± 1.15	44.36 ^a ± 5.07	14.50 ^b ± 0.71				
Citric/Ascorbic								
CaCl ₂	62.89 ^b ± 2.04	8.00 ^a ± 1.62	44.15 ^a ± 0.17	13.70 ^b ± 0.35				
VI	60.83 ^b ± 1.10	8.34 ^a ± 1.11	37.76 ^b ± 0.06	19.00 ^a ± 1.41				
5,15	62.37 ^b ± 2.14	6.74 ^b ± 0.07	37.44 ^b ± 4.28	18.08 ^a ± 0.46	50.46 ^a ± 20.52	6.09 ± 0.98	7.44 ^b ± 0.32	9.57 ^{ab} ± 2.25
5,25	61.51 ^b ± 0.10	7.61 ^b ± 0.47	35.39 ^b ± 1.41	18.25 ^a ± 1.06	52.39 ^a ± 4.17	7.10 ± 0.95	8.81 ^{ab} ± 1.87	11.06 ^a ± 3.64
5,35	63.54 ^b ± 0.32	7.19 ^b ± 1.26	34.86 ^b ± 1.48	18.45 ^a ± 0.64	46.25 ^a ± 19.77	6.71 ± 0.54	10.61 ^a ± 0.40	14.35 ^a ± 1.73
					38.92 ^{ab} ±			
6,15	62.13 ^b ± 1.07	6.91 ^b ± 1.88	34.84 ^b ± 6.59	18.08 ^a ± 0.96	21.87	6.81 ± 1.72	7.54 ^b ± 0.70	8.54 ^b ± 2.08
6,25	63.38 ^b ± 0.42	6.46 ^b ± 0.53	34.54 ^b ± 3.07	18.20 ^a ± 1.70	49.68 ^a ± 12.57	6.22 ± 1.24	11.92 ^a ± 1.61	12.03 ^a ± 0.51
6,35	62.33 ^b ± 1.23	6.94 ^b ± 1.27	37.51 ^b ± 4.31	18.25 ^a ± 0.35	39.52 ^{ab} ± 6.65	5.57 ± 1.15	10.07 ^a ± 1.29	12.71 ^a ± 1.52
7,15	63.65 ^b ± 1.35	7.21 ^b ± 1.69	36.82 ^b ± 4.81	18.33 ^a ± 0.81	43.93 ^a ± 16.14	7.61 ± 1.62	7.68 ^b ± 0.34	10.14 ^a ± 1.04
7,25	63.55 ^b ± 0.94	6.94 ^b ± 1.58	32.63 ^b ± 6.14	18.28 ^a ± 0.52	32.22 ^b ± 1.90	7.08 ± 1.11	9.61 ^a ± 0.56	10.23 ^a ± 0.50
7,35	62.42 ^b ± 1.11	7.28 ^b ± 1.16	36.56 ^b ± 1.15	17.70 ^a ± 0.99	46.72 ^a ± 1.96	6.66 ± 0.81	10.82 ^a ± 1.24	12.81 ^a ± 0.98

ตารางผนวกที่ ๓7 (ต่อ)

หมายเหตุ Fz. at Center คือ อัตราการแซ่เยือกแข็งที่อุณหภูมิใจกลางชิ้นมะม่วง, Fz. at Surface คือ อัตราการแซ่เยือกแข็งที่อุณหภูมิผิวชิ้นมะม่วง
ตัวเลข คือ [H/D, ความเร็วลม(m/s)]
^{ns} คือค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)
ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางผนวกที่ ค8 ลักษณะของมะม่วงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบเป่าปะทะไอน้ำ โดยใช้หัวเป่าลมหัวบนและการทำละลาย

Condition	L* ^{ns}	a*	b* ^{ns}	° Brix ^{ns}	% Force loss	% Drip loss	Fz. at Center	Fz. at Surface
Fresh	62.62 ± 2.84	14.65 ^a ± 4.98	41.21 ± 8.14	15.68 ± 0.18				
Citric/Ascorbic								
CaCl ₂	59.20 ± 3.27	13.19 ^a ± 0.26	40.09 ± 0.83	14.25 ± 0.49				
5,15	57.42 ± 2.19	10.49 ^b ± 1.01	36.40 ± 3.52	13.98 ± 0.39	36.62 ^b ± 10.47	12.27 ^a ± 0.66	5.82 ^b ± 0.50	8.43 ^{ab} ± 0.68
5,25	60.48 ± 3.47	10.31 ^b ± 1.41	41.16 ± 2.58	13.85 ± 0.49	48.19 ^a ± 3.06	12.98 ^a ± 0.77	7.89 ^a ± 1.34	11.40 ^a ± 3.08
5,35	59.51 ± 4.16	9.48 ^b ± 0.41	37.73 ± 0.80	14.45 ± 1.34	42.84 ^a ± 6.59	10.60 ^b ± 0.53	9.14 ^a ± 1.53	11.97 ^a ± 1.67
6,15	58.26 ± 4.02	9.54 ^b ± 1.48	33.88 ± 3.42	13.90 ± 0.28	46.82 ^a ± 11.09	11.39 ^b ± 1.21	7.58 ^a ± 1.54	10.11 ^a ± 1.21
6,25	58.73 ± 3.35	10.13 ^b ± 0.75	40.54 ± 1.07	15.00 ± 0.71	44.21 ^a ± 13.14	11.82 ^{ab} ± 0.98	10.21 ^a ± 0.83	8.94 ^{ab} ± 0.35
6,35	58.78 ± 1.33	10.00 ^b ± 0.04	39.39 ± 4.91	14.63 ± 0.88	50.73 ^a ± 3.72	12.18 ^a ± 0.13	8.17 ^a ± 0.80	10.21 ^a ± 2.05
7,15	59.91 ± 4.17	9.60 ^b ± 1.46	37.94 ± 0.06	15.23 ± 0.74	47.85 ^a ± 17.13	11.99 ^a ± 0.69	7.18 ^a ± 0.33	7.88 ^b ± 0.45
7,25	59.79 ± 1.61	9.49 ^b ± 0.75	36.07 ± 2.04	14.25 ± 0.78	52.97 ^a ± 4.59	13.12 ^a ± 0.19	7.95 ^a ± 0.82	10.46 ^a ± 1.94
7,35	58.47 ± 3.20	9.60 ^b ± 1.91	37.36 ± 5.25	14.10 ± 0.42	51.59 ^a ± 4.62	12.34 ^a ± 0.51	7.79 ^a ± 0.47	10.30 ^a ± 0.21

ตารางผนวกที่ ค8 (ต่อ)

หมายเหตุ Fz. at Center คือ อัตราการแซ่เยือกแข็งที่อุณหภูมิใจกลางชิ้นมะม่วง, Fz. at Surface คือ อัตราการแซ่เยือกแข็งที่อุณหภูมิผิวชิ้นมะม่วง
ตัวเลข คือ [H/D, ความเร็วลม(m/s)]

^{ns} คือค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางผนวกที่ ๑๑ ลักษณะของมะม่วงอินพีวชันที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบเป่าปะทะไอน้ำ โดยใช้หัวเป่าลมหัวบน + หัวล่างและการทำละลาย

Condition	L*	a*	b* ^{ns}	° Brix	% Force loss	% Drip loss ^{ns}	Fz. at Center ^{ns}	Fz. at Surface
Fresh	70.98 ^a ± 2.51	7.54 ^b ± 1.15	44.36 ± 5.07	14.00 ^d ± 0.35				
Citric/Ascorbic								
CaCl ₂	62.10 ^b ± 0.36	9.78 ^a ± 3.07	43.78 ± 2.16	12.75 ^d ± 0.35				
VI	59.91 ^b ± 0.15	7.97 ^b ± 2.50	32.56 ± 1.74	17.53 ^{abc} ± 0.74				
5,10	61.22 ^b ± 1.82	6.33 ^b ± 1.43	35.03 ± 5.49	18.00 ^a ± 0.00	59.21 ^a ± 8.15	7.66 ± 0.36	7.39 ± 0.12	8.22 ^b ± 0.35
5,15	61.59 ^b ± 4.28	6.93 ^b ± 2.09	32.90 ± 7.44	17.93 ^{ab} ± 0.60	48.41 ^a ± 9.80	7.08 ± 0.52	8.07 ± 1.83	9.35 ^b ± 0.62
5,20	61.78 ^b ± 2.03	6.36 ^b ± 1.52	35.91 ± 9.80	17.35 ^{abc} ± 0.14	61.28 ^a ± 10.04	6.75 ± 0.34	7.53 ± 0.85	10.27 ^{ab} ± 1.80
6,10	63.31 ^b ± 1.00	5.33 ^b ± 0.50	38.13 ± 8.04	17.20 ^{abc} ± 0.71	57.45 ^a ± 7.80	7.11 ± 0.65	5.89 ± 0.22	10.38 ^{ab} ± 2.19
6,15	64.81 ^b ± 0.46	5.46 ^b ± 0.98	36.69 ± 3.33	16.63 ^c ± 0.18	51.71 ^a ± 9.70	7.93 ± 0.34	8.24 ± 0.88	9.83 ^b ± 1.79
6,20	61.00 ^b ± 0.41	6.12 ^b ± 1.19	34.95 ± 4.01	16.90 ^{abc} ± 0.00	48.88 ^a ± 2.25	7.03 ± 0.37	9.11 ± 0.68	12.10 ^a ± 1.22
7,10	62.12 ^b ± 0.22	6.85 ^b ± 1.62	42.39 ± 2.07	17.75 ^{abc} ± 0.92	55.86 ^a ± 0.73	7.44 ± 0.37	7.31 ± 1.71	8.67 ^b ± 0.90
7,15	61.80 ^b ± 1.66	5.83 ^b ± 0.03	35.96 ± 5.96	17.20 ^{acb} ± 0.42	39.28 ^b ± 11.89	6.91 ± 1.21	7.71 ± 0.86	10.63 ^{ab} ± 1.05
7,20	64.90 ^b ± 2.93	5.38 ^b ± 0.28	36.62 ± 7.60	16.75 ^{bc} ± 0.49	48.31 ^a ± 0.28	6.86 ± 1.08	8.50 ± 2.09	13.80 ^a ± 2.07

ตารางผนวกที่ ๑๑ (ต่อ)

หมายเหตุ Fz. at Center คือ อัตราการแซ่เยือกแข็งที่อุณหภูมิใจกลางชิ้นมะม่วง, Fz. at Surface คือ อัตราการแซ่เยือกแข็งที่อุณหภูมิผิวชิ้นมะม่วง
ตัวเลข คือ [H/D, ความเร็วลม(m/s)]

^{ns} คือค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางผนวกที่ ค10 ลักษณะของมะม่วงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบเป่าปะทะไอน้ำ โดยใช้หัวเป่าลมหัวบน+ หัวล่างและการทำ
ละลาย

Condition	L* ^{ns}	a*	b*	° Brix	% Force loss ^{ns}	%Drip loss ^{ns}	Fz. at Center ^{ns}	Fz. at Surface ^{ns}
Fresh	60.99 ± 3.27	14.28 ^a ± 0.26	45.44 ^a ± 0.83	15.88 ^a ± 0.18				
Citric/Ascorbic								
CaCl ₂	59.00 ± 2.84	13.64 ^a ± 4.98	36.66 ^b ± 8.14	13.15 ^{ab} ± 0.49				
5,10	58.77 ± 2.19	10.97 ^{ab} ± 1.01	37.00 ^b ± 3.52	13.58 ^{ab} ± 0.60	56.22 ± 11.03	13.27 ± 1.77	6.90 ± 0.25	8.34 ± 0.18
5,15	54.88 ± 7.47	11.68 ^{ab} ± 1.41	40.34 ^b ± 2.58	13.90 ^{ab} ± 0.28	56.26 ± 8.24	10.76 ± 1.28	7.83 ± 1.17	9.44 ± 1.80
5,20	58.19 ± 4.16	9.29 ^b ± 0.41	38.13 ^b ± 1.32	13.30 ^{ab} ± 0.28	56.82 ± 2.68	11.38 ± 1.04	8.40 ± 1.29	10.45 ± 0.42
6,10	58.17 ± 4.02	10.83 ^{ab} ± 1.48	39.11 ^b ± 3.42	13.08 ^{ab} ± 0.32	59.75 ± 6.07	12.07 ± 1.74	6.56 ± 0.16	7.63 ± 0.40
6,15	58.64 ± 3.35	10.12 ^b ± 0.75	40.99 ^b ± 1.07	12.70 ^b ± 0.85	65.43 ± 3.67	11.59 ± 1.75	7.42 ± 0.25	9.96 ± 0.44
6,20	57.87 ± 1.33	11.11 ^a ± 0.34	37.42 ^b ± 2.08	13.53 ^{ab} ± 0.25	55.39 ± 4.67	11.03 ± 0.24	7.34 ± 0.48	8.29 ± 0.34
7,10	56.52 ± 4.17	10.53 ^b ± 1.46	38.01 ^b ± 0.06	13.03 ^{ab} ± 0.81	53.22 ± 6.29	13.71 ± 0.36	6.18 ± 0.32	7.55 ± 0.18
7,15	58.09 ± 1.61	10.42 ^b ± 0.75	37.75 ^b ± 2.04	14.05 ^a ± 0.64	63.52 ± 7.37	12.33 ± 0.08	6.51 ± 0.32	8.39 ± 0.70
7,20	55.81 ± 7.20	10.94 ^{ab} ± 1.91	40.26 ^b ± 5.25	13.35 ^{ab} ± 0.35	56.49 ± 2.11	11.50 ± 0.81	8.57 ± 0.84	11.83 ± 0.92

ตารางผนวกที่ ค10 (ต่อ)

หมายเหตุ Fz. at Center คือ อัตราการแซ่เยือกแข็งที่อุณหภูมิใจกลางชิ้นมะม่วง, Fz. at Surface คือ อัตราการแซ่เยือกแข็งที่อุณหภูมิผิวชิ้นมะม่วง
ตัวเลข คือ [H/D, ความเร็วลม(m/s)]

^{ns} คือค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางผนวกที่ 11 ลักษณะของมะม่วงอินฟิวชันที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบเป่าปะทะไอพ่นด้วยสภาวะที่ให้ผลดีสำหรับการใช้หั่วเป่าลมหั่วบน และหั่วบน + หั่วล่างและการทำละลาย

Condition	L*	a* ^{ns}	b*	° Brix	% Force loss	% Drip loss	Fz. at Center ^{ns}	Fz. at Surface ^{ns}
Fresh	70.07 ^a ± 7.60	10.57 ^a ± 2.65	50.43 ^a ± 5.12	14.45 ^b ± 0.49				
Citric/Ascorbic								
CaCl ₂	67.03 ^a ± 12.22	10.94 ± 1.84	45.44 ^b ± 10.77	13.98 ^b ± 1.03				
VI	63.89 ^b ± 8.39	9.40 ± 1.91	41.32 ^b ± 3.28	17.84 ^a ± 1.36				
Jet 1	60.69 ^b ± 0.42	7.86 ± 0.15	29.48 ^c ± 1.88	17.35 ^a ± 0.71	39.32 ^b ± 6.65	5.57 ^b ± 1.15	10.07 ± 1.29	12.71 ± 1.53
Jet 2	61.88 ^b ± 1.45	8.05 ± 1.15	31.74 ^c ± 3.79	18.28 ^a ± 0.74	48.11 ^a ± 0.28	6.86 ^a ± 1.08	8.50 ± 2.09	13.80 ± 2.07
Cryogenic	60.16 ^b ± 0.12	8.13 ± 0.84	33.57 ^c ± 2.76	18.45 ^a ± 1.48	32.78 ^c ± 10.93	6.30 ^a ± 0.61	9.62 ± 0.59	10.30 ± 0.81

หมายเหตุ Fz. at Center คือ อัตราการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิใจกลางชิ้นมะม่วง, Fz. at Surface คือ อัตราการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิผิวชิ้นมะม่วง

Jet 1 คือ การใช้หั่วเป่าลมหั่วบน, H/D = 6 และความเร็วม = 35 เมตรต่อวินาที (6,35)

Jet 2 คือ การใช้หั่วเป่าลมหั่วบน + หั่วล่าง, H/D = 7 และความเร็วม = 20 เมตรต่อวินาที (7,20)

^{ns} คือค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางผนวกที่ ค12 ลักษณะของมะม่วงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบเป่าปะทะไอน้ำด้วยสภาวะที่ให้ผลดีสำหรับการใช้หั่วเป่าลมหั่วบน และหั่วบน + หั่วล่างและการทำละลาย

Condition	L*	a* ^{ns}	b*	° Brix	% Force loss	% Drip loss ^{ns}	Fz. at Center	Fz. at Surface
Fresh	69.42 ^a ± 4.36	8.68 ± 6.08	49.94 ^a ± 5.88	16.63 ^a ± 0.18				
Citric/Ascorbic								
CaCl ₂	63.41 ^{ab} ± 7.45	8.64 ± 6.70	43.03 ^b ± 11.31	15.88 ^a ± 0.18				
Jet 1	57.87 ^b ± 1.32	11.11 ± 0.34	37.42 ^b ± 2.08	13.90 ^b ± 0.28	42.84 ^a ± 6.59	10.60 ± 0.53	9.14 ^a ± 1.53	11.97 ^a ± 1.67
Jet 2	54.88 ^b ± 7.47	11.68 ± 1.41	40.34 ^b ± 2.58	14.45 ^{ab} ± 0.28	56.26 ^b ± 8.24	10.76 ± 1.28	7.83 ^a ± 1.17	9.44 ^{ab} ± 1.80
Cryogenic	60.33 ^b ± 7.28	9.23 ± 0.35	41.78 ^b ± 0.68	15.10 ^a ± 0.14	45.38 ^a ± 0.62	10.90 ± 1.24	4.88 ^b ± 1.03	7.64 ^b ± 1.71

หมายเหตุ Fz. at Center คือ อัตราการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิใจกลางชิ้นมะม่วง, Fz. at Surface คือ อัตราการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิผิวชิ้นมะม่วง

Jet 1 คือ การใช้หั่วเป่าลมหั่วบน, H/D = 5 และความเร็วลม = 35 เมตรต่อวินาที (5,35)

Jet 2 คือ การใช้หั่วเป่าลมหั่วบน + หั่วล่าง, H/D = 5 และความเร็วลม = 15 เมตรต่อวินาที (5,15)

^{ns} คือค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นางสาววันวิสา ศรีวิมล
วัน เดือน ปี ที่เกิด	13 เมษายน 2527
สถานที่เกิด	นครศรีธรรมราช
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร) ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	Sriwimon, W. and W. Boonsupthip. 2011. Utilization of partially ripe mangoes for freezing preservation by impregnation of mango juice and sugars. LTW-Food Science and Technology. 44: 375-383.
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนผู้ช่วยสอนประจำภาคต้น ปีการศึกษา 2551