บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 ก๋วยเตี๋ยว (rice noodle)

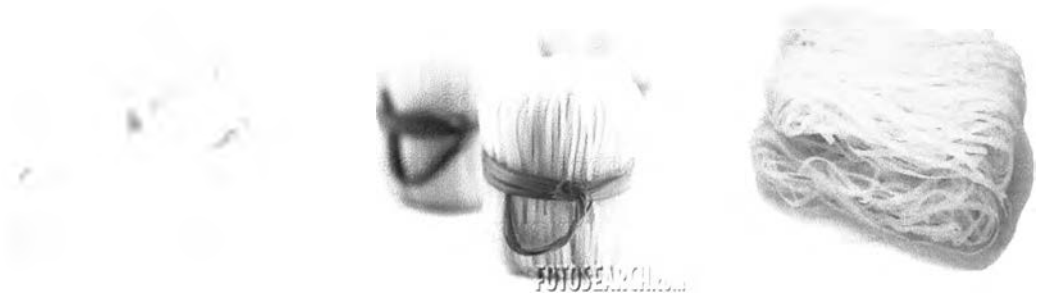
ก๋วยเตี๋ยวมีต้นกำเนิดในประเทศจีน ชาวจีนแผ่นดินใหญ่รู้จักการทำก๋วยเตี๋ยว เส้นหมี่ และบะหมี่นับพันปีมาแล้ว โดยชาวจีนทางภาคเหนือของแผ่นดินใหญ่ซึ่งมีอากาศค่อนข้างหนาวจะปลูกข้าวสาลีมากและบริโภคข้าวสาลีในรูปของเส้นบะหมี่ เรียกว่า "Mein" ชาวจีนทางภาคใต้ซึ่งมีอากาศร้อนจะปลูกข้าวเจ้ามาก ก็สามารถผลิตอาหารที่มีลักษณะเป็นเส้นยาวๆได้เช่นเดียวกันแต่จะผลิตจากแป้งข้าวเจ้าและเรียกว่า "Mein" เช่นกัน ดังนั้น Mein คืออาหารที่มีลักษณะเป็นเส้นกลมยาวหรือเป็นเส้นแบนยาว ผลิตได้จากแป้งสาลี แป้งข้าวเจ้า หรือแป้งถั่วเขียว ได้แก่ เส้นบะหมี่ เส้นหมี่ เส้นก๋วยเตี๋ยว หรือวุ้นเส้น ซึ่งตรงกับภาษาอังกฤษคำว่า "Noodle" นั่นเอง สำหรับชาวจีน Mein ถือเป็นสัญลักษณ์แห่งความยั่งยืน (longevity symbol) ชาวจีนจึงมักใช้เส้นบะหมี่ เส้นหมี่ หรือเส้นก๋วยเตี๋ยวปรุงเป็นอาหารเลี้ยงในวันเกิด เพื่ออวยพรให้มีอายุยั่งยืนเหมือนกับการตัดเค้กในงานวันเกิดที่นิยมกันในปัจจุบัน (Hahn, 1973) ก๋วยเตี๋ยวเริ่มเป็นที่รู้จักกันแพร่หลายในสมัยราชวงศ์ฮั่นของจีน สำหรับประเทศไทยคาดว่าก๋วยเตี๋ยวน่าจะเข้ามาพร้อมกับคนจีนที่อพยพเข้ามาอยู่ในประเทศไทย (เสนอ ร่วมจิตร, 2522)

ก๋วยเตี๋ยว คือ ผลิตภัณฑ์อาหารเส้นที่แปรรูปมาจากแป้งข้าวเจ้า และอาจมีแป้งชนิดอื่นผสมอยู่ด้วย แบ่งตามปริมาณความชื้นเป็น 3 ชนิด (กัลยาณี ดีประเสริฐวงศ์, 2539)

1. เส้นก๋วยเตี๋ยวสด คือ ก๋วยเตี๋ยวที่ได้จากการนำก๋วยเตี๋ยวหลังนึ่งสุกมาตัดเป็นเส้นโดยไม่ผ่านขั้นตอนการอบแห้ง ซึ่งอาจเป็นเส้นเล็กหรือเส้นใหญ่ก็ได้ เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีอายุการเก็บรักษาสั้น ต้องบริโภคภายใน 1–2 วัน

2. เส้นก๋วยเตี๋ยวกึ่งแห้ง คือ ก๋วยเตี๋ยวที่ผ่านการอบแห้งเพื่อลดปริมาณความชื้นลงเหลือประมาณร้อยละ 37 แล้วจึงตัดเป็นเส้น โดยปกติจะเก็บได้ 2–3 วัน

3. เส้นก๋วยเตี๋ยวแห้ง คือ ก๋วยเตี๋ยวที่มีการตัดเป็นเส้นและทำให้แห้งด้วยการอบจนมีความชื้นประมาณร้อยละ13 หรือต่ำกว่า มีอายุการเก็บรักษานานถึง 1 ปี



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 2.1 ชนิดของเส้นก๋วยเตี๋ยวแบ่งตามปริมาณความชื้น (ก) เส้นก๋วยเตี๋ยวสด (ข) เส้นก๋วยเตี๋ยวกึ่งแห้ง (ค) เส้นก๋วยเตี๋ยวแห้ง

ที่มา: รูปที่ 2.1 (ก) และ (ค) Alden (2006)

รูปที่ 2.1 (ข) Publitek (2006)

2.2 การผลิตก๋วยเตี๋ยว

2.2.1 วัตถุดิบในการผลิตก๋วยเตี๋ยว

วัตถุดิบหลักในการผลิตก๋วยเตี๋ยวคือ ข้าวและน้ำ ทั้งสองส่วนมีความสำคัญและส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของก๋วยเตี๋ยวที่ได้

ข้าว

ข้าวที่ใช้ในการผลิตก๋วยเตี๋ยวคือข้าวเจ้า ข้าวเจ้าที่ปลูกในประเทศไทยมีหลายพันธุ์ แต่ละพันธุ์มีความเหมาะสมในการนำไปใช้แตกต่างกัน เนื่องจากข้าวแต่ละพันธุ์มีองค์ประกอบทางเคมีและกายภาพแตกต่างกัน ในการผลิตก๋วยเตี๋ยว ข้าวเจ้าที่นำมาใช้คือส่วนที่เป็นปลายข้าวหรือข้าวสารหักซึ่งเป็นของเหลือจากการสีข้าวและมักรวมข้าวพันธุ์ต่างๆไว้ด้วยกัน พันธุ์ข้าวเหล่านี้มีทั้งข้าวที่เหนียวนุ่มจนถึงร่วนแข็ง การควบคุมคุณภาพวัตถุดิบให้สม่ำเสมอจึงทำได้ยาก ผู้ผลิตส่วนใหญ่อาศัยประสบการณ์และความชำนาญในการคัดเลือกปลายข้าวที่นำมาผลิต ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีคุณภาพไม่ค่อยสม่ำเสมอ จากการศึกษาวิจัยเพื่อหาวิธีทางวิทยาศาสตร์มาใช้ควบคุมคุณภาพวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยว โดยนำข้าวพันธุ์ต่างๆมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว พบว่าปริมาณอะไมโลสในข้าวพันธุ์ต่างๆเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของเส้นก๋วยเตี๋ยว เส้นก๋วยเตี๋ยวที่ผลิตจากข้าวเจ้าพันธุ์ที่มีปริมาณอะไมโลสต่างกันจะมีคุณภาพแตกต่างกัน โดยเฉพาะในด้านความเหนียวและความคงตัวของเส้นเมื่อผ่านการลวก ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญที่มีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค (พิมพ์เพ็ญ ถิรพร, 2533) โดยเสนอ ร่วมจิตร

(2522) และณรงค์ นิยมวิทย์ (2535) พบว่าข้าวเจ้าพันธุ์ที่เหมาะสมในการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวให้มีคุณภาพเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคต้องมีปริมาณอะไมโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 27-33 ซึ่งเป็นข้าวพันธุ์อะไมโลสสูง เช่น ข้าวเจ้าพันธุ์เหลืองประทิว-123, กข.1, ข้าวขาว-500 และ กข.5 เพราะข้าวเหล่านี้เมื่อนำไปหุงจะมีการขยายตัวของเม็ดแป้งอย่างสม่ำเสมอ เม็ดแป้งมีความแข็งแรง ไม่ยุบตัวง่าย สามารถต้านการแตกสลายเมื่อหุงต้มมากเกินไป และสามารถทำเป็นแผ่นได้ดี ถ้าแป้งที่ใช้มีปริมาณอะไมโลสต่ำกว่าร้อยละ 20 ก๋วยเตี๋ยวหลังนึ่งสุกจะเละ เปื่อย และขาดง่ายจนไม่สามารถลอกออกเป็นแผ่นได้ แต่ถ้าปริมาณอะไมโลสสูงกว่าร้อยละ 33 เส้นก๋วยเตี๋ยวจะมีเนื้อสัมผัสที่แห้งและแข็งกระด้าง ส่งผลให้การยอมรับของผู้บริโภคลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวเจ้าที่ใช้ควรเป็นข้าวเก่าที่ผ่านการเก็บรักษาประมาณ 3-4 เดือน เนื่องจากระหว่างการเก็บรักษา เมล็ดข้าวจะมีความชื้นลดลง มีความสามารถในการดูดน้ำและขยายปริมาตร (volume expansion) มากขึ้น เมื่อนำไปหุงจะได้ข้าวสุกที่ร่วนและแข็ง เมื่อนำไปผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวจะได้เส้นก๋วยเตี๋ยวที่เหนียว ไม่ขาดง่าย ไม่ติดสายพานหลังนึ่ง และการสูญเสียระหว่างกระบวนการผลิตลดลง (เสนอ ร่วมจิตร, 2522; งามชื่น คงเสรี, 2541)

น้ำ

น้ำที่ใช้ในการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวควรเป็นน้ำสะอาด เหมาะสำหรับการบริโภค ควรมี pH 5.0–7.0 เพราะจะทำให้เกิดเจลที่ดี ถ้าสูงหรือต่ำกว่านี้เจลของเส้นก๋วยเตี๋ยวจะมีความเหนียวลดลง เนื่องจากเม็ดแป้งจะเกิดการแตกและมีขนาดเล็กลง เกิดเจลได้ยากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำที่ใช้ไม่ควรมีเกลือของแคลเซียมหรือแมกนีเซียมมากเกินไป เพราะเกลือนี้จะทำให้น้ำซึมผ่านเม็ดแป้งได้ยาก เม็ดแป้งจึงดูดน้ำและพองตัวได้น้อยลง ทำให้เจลของเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ได้มีความเหนียวลดลง (ณรงค์ นิยมวิทย์, 2535; พิมพ์เพ็ญ ถิรพร, 2533; งามชื่น คงเสรี, 2541)

นอกจากข้าวและน้ำแล้ว โรงงานก๋วยเตี๋ยวจะมีการผสมแป้งมันสำปะหลังลงในแป้งข้าวเจ้าเพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวที่ได้ โดยพิมพ์เพ็ญ ถิรพร (2533) ได้ศึกษาการผสมแป้งมันสำปะหลังซึ่งมีอะไมโลส 30.8% ปริมาณ 0, 10, 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนักลงในแป้งข้าวเจ้า 3 พันธุ์ คือ กข7 KTH17 และ กข9 ซึ่งมีปริมาณอะไมโลส 25.06, 29.14 และ 31.5% ตามลำดับ และวัดปริมาณอะไมโลส พบว่าการผสมแป้งมันสำปะหลังมีผลให้ปริมาณอะไมโลสของแป้งผสมจากข้าวพันธุ์ กข7 และ KTH17 เพิ่มขึ้น แต่แป้งผสมจากข้าวพันธุ์ กข9 มีปริมาณอะไมโลสลดลง โดยปริมาณอะไมโลสที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เติมลงไป จากนั้นนำมาผลิตเป็นแผ่นก๋วยเตี๋ยวเปรียบเทียบกับการใช้แป้งข้าวเจ้าเพียงอย่างเดียวพบว่า การผสมแป้งมันสำปะหลังมีผลให้ก๋วยเตี๋ยวที่ได้ทุกสูตรมีความนุ่ม

ความเหนียว และความเลื่อมมันมากขึ้น และคะแนนการยอมรับสูงกว่าการใช้แป้งข้าวเจ้าล้วน นอกจากนี้ยังมีผลให้ %cooking loss ลดลงด้วย โดยปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เหมาะสมที่ให้คะแนนการยอมรับสูงสุดคือ 20% และ 20-30% โดยน้ำหนัก เมื่อใช้ข้าวเจ้าพันธุ์ KTH17 และกข 9 ตามลำดับ ส่วนข้าวเจ้าพันธุ์ กข7 ซึ่งมีปริมาณอะไมโลสต่ำไม่เหมาะสมในการผลิตก๋วยเตี๋ยวได้ เนื่องจากให้เส้นก๋วยเตี๋ยวที่เปื่อยยุ่ย

2.2.2 **ขั้นตอนการผลิตก๋วยเตี๋ยว**

การผลิตก๋วยเตี๋ยวมีขั้นตอนสำคัญดังนี้

<u>การทำความสะอาดและการแช่ข้าว</u>

ข้าวหรือปลายข้าวที่ซื้อมาเป็นวัตถุดิบมักมีสิ่งสกปรกเจือปนมาด้วย จึงจำเป็นต้องมีการเอาสิ่งสกปรกออกโดยการร่อนผ่านตะแกรงร่อน จากนั้นจึงล้างด้วยน้ำและขัดสีข้าวจนขาวสะอาด ซึ่งการล้างและขัดสีข้าวมีผลให้เส้นก๋วยเตี๋ยวที่ได้มีสีขาวสะอาด เก็บได้นานขึ้น เนื่องจากไขมัน โปรตีน และสิ่งเจือปนส่วนใหญ่ถูกขัดล้างออกไป (เสนอ ร่วมจิตร, 2522) จากนั้นนำไปแช่ในน้ำสะอาดเพื่อให้ข้าวอ่อนตัว ง่ายต่อการโม่

<u>การโม่ข้าว</u>

ในการผลิตก๋วยเตี๋ยวจะนิยมใช้การโม่เปียก เนื่องจากเม็ดแป้งที่ได้จะแตกมากกว่า มีขนาดเล็กกว่า มีความละเอียดมากกว่า และมีอายุการเก็บรักษานานกว่า เนื่องจากไขมันและสิ่งเจือปนบางส่วนถูกกำจัดออกไป เมื่อนำไปผลิตก๋วยเตี๋ยวเส้นที่ได้จะมีความเหนียวสูงกว่าการโม่แห้งและการโม่ผสม (งามชื่น คงเสรี, 2541) นอกจากนี้ พัชรี เนตรน้อย (2538) ยังพบว่า แป้งที่ผ่านการโม่เปียก 2 ครั้ง เมื่อนำมาผลิตก๋วยเตี๋ยวจะได้เส้นก๋วยเตี๋ยวที่มีความเหนียวนุ่มมากกว่าการโม่เพียง 1 ครั้ง

<u>การปรับความเข้มข้นของน้ำ</u>

ความเข้มข้นของน้ำแป้งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลโดยตรงต่อคุณภาพของก๋วยเตี๋ยวที่ได้ มีการศึกษาความเข้มข้นของน้ำแป้งที่เหมาะสมในการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว โดยใช้น้ำแป้งความเข้มข้นร้อยละ 30-50 โดยน้ำหนัก พบว่าความเข้มข้นน้ำแป้งร้อยละ 40 สามารถผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวที่มีลักษณะดีและเป็นที่ยอมรับของผู้ทดสอบมากที่สุด ถ้าความเข้มข้นของน้ำแป้งน้อยกว่าร้อยละ 35 จะไม่สามารถผลิตเป็นเส้นก๋วยเตี๋ยวได้ แต่ถ้าสูงกว่าร้อยละ 40 น้ำที่ใช้จะไม่เพียงพอให้เม็ดแป้งพองตัว เส้นก๋วยเตี๋ยวที่ได้จะแข็งกระด้าง ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

(เสนอ ร่วมจิตร, 2522; พัชรี เนตรน้อย, 2538; มณีรัตน์ จงสุขกิจพานิช, 2538) แต่วิภา สุโรจนะเมธากุล (2541) พบว่าปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตก๋วยเตี๋ยวขึ้นอยู่กับความเก่าของข้าว และปริมาณอะไมโลสของข้าวที่นำมาใช้ด้วย ถ้าข้าวที่ใช้เป็นข้าวเก่าและมีปริมาณอะไมโลสสูง ต้องใช้น้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น และขึ้นกับชนิดของก๋วยเตี๋ยวที่ผลิต คือความเข้มข้นน้ำแป้งที่ใช้ในการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวสดจะน้อยกว่าการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแห้ง

การนึ่ง

ในโรงงานอุตสาหกรรม น้ำแป้งจะผ่านสายพานเข้าตู้นึ่งไอน้ำประมาณ 1-2 นาที โดยระหว่างการนึ่งจะมีน้ำมันพืชหยดเป็นระยะเพื่อให้เส้นมัน ลื่น ไม่ติดสายพาน (อรพิน ภูมิภมร, 2532) แต่ในการงานวิจัยนี้จะใช้ถาดอะลูมิเนียมและนึ่งในรังถึง ซึ่งเวลาที่ใช้ในการนึ่งจะต้องเพิ่มเวลาเป็น 2-3 นาที เส้นก๋วยเตี๋ยวจึงจะสุกพอดี (Siegel, Bhumiratana, and Lineback, 1975; เสนอ ร่วมจิตร, 2522; ณรงค์ นิยมวิทย์, 2535)

การผึ่งลม การอบ และการตัดเส้นก๋วยเตี๋ยว

สำหรับเส้นก๋วยเตี๋ยวสด จะนำไปตัดเป็นเส้นและจำหน่ายทันที กรณีเส้นก๋วยเตี๋ยวอบแห้งหรือก๋วยเตี๋ยวเส้นจันทน์จะต้องนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 45–50 องศาเซลเซียส นาน 4–5 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้นเหลือ 11–12% แล้วจึงจำหน่าย (กัลยาณี ดีประเสริฐวงศ์, 2539)

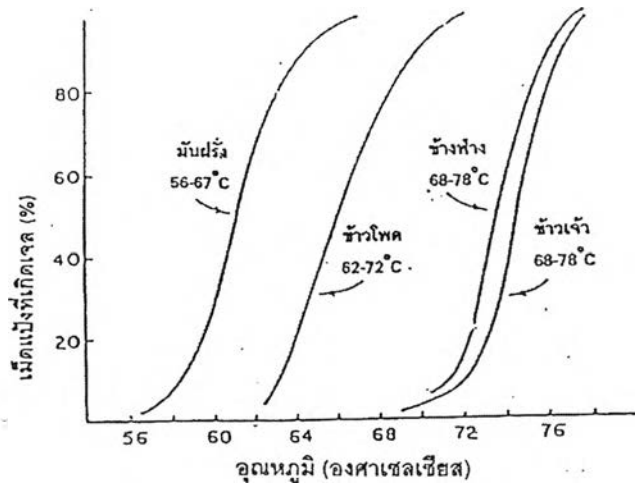
2.2.3 การเปลี่ยนแปลงของแป้งเมื่อได้รับความร้อน

วัตถุดิบสำคัญในการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวคือน้ำแป้ง ดังนั้นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของน้ำแป้งหลังได้รับความร้อนจนกระทั่งเป็นแผ่นก๋วยเตี๋ยวจึงมีความสำคัญ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกี่ยวข้องคือ

การเกิดเจลาติไนเซชัน (gelatinization)

การเกิดเจลาติไนเซชันเป็นกระบวนการที่เม็ดแป้งเกิดการดูดซึมน้ำและพองตัวขณะที่ได้รับความร้อน โดยทั่วไปโมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนและอยู่ในรูปร่างแห เมื่อนำแป้งมาละลายในน้ำ เม็ดแป้งจึงดูดน้ำและพองตัวได้เพียงเล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำแป้งให้สูงขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของเม็ดแป้งจะอ่อนลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำและพองตัวได้เพิ่มขึ้น น้ำแป้งจะเริ่มหนืดและใสขึ้น เรียกว่า การเกิดเจลาติไนเซชัน หรือเกิดการสุกของแป้ง (Leach, 1965; Osman, 1967) แป้งแต่ละชนิดมีอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันแตกต่างกัน (รูปที่ 2.2) และไม่เกิดที่อุณหภูมิใด

อุณหภูมิหนึ่ง แต่จะเกิดในช่วงกว้าง 8-12 องศาเซลเซียส (กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2543) ซึ่งการตรวจสอบกระบวนการเกิดเจลาติไนเซชันสามารถทำได้หลายวิธี



รูปที่ 2.2 %การเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดแป้งแต่ละชนิด (Sanders, 1996)

Schoch และ Maywald (1967) ได้ศึกษาการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีการสังเกตการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง birefringence ของเม็ดแป้งภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบ Kofler (Kofler hot stage microscope) ซึ่งเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่มีระบบการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างน้ำแป้งบนแผ่นสไลด์อย่างต่อเนื่องและสังเกตการเปลี่ยนแปลงผ่านแสงโพลาไรซ์ ได้ผลดังตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลังเมื่อวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ Kofler (Kofler hot stage microscope)

ชนิดแป้ง	ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน (°C)
แป้งข้าวเจ้า	68.0 - 74.5 – 78.0
แป้งมันสำปะหลัง	
- พันธุ์บราซิลเลียน (Brazilian)	49.0 – 57.0 - 64.5
- พันธุ์ไซแอมิส (Siamese)	62.0 – 68.0 – 73.0
- พันธุ์โดมินิกัน (Dominican)	58.5 - 64.5 - 70

ที่มา: ดัดแปลงจาก Schoch และ Maywald (1967)

อรวรรณ เคหสุขเจริญ (2529) ได้ศึกษาการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลังที่มีจำหน่ายในประเทศไทย 2 วิธี คือวิธีการติดสีคองโก-เรดของเม็ดแป้งที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งวิธีนี้ใช้หลักการคล้ายกับการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ Kofler แต่ใช้การสังเกตการติดสีของเม็ดแป้งแทน โดยรายงานค่าเป็นช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน และวิธีการติดตามการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งด้วย Brabender Amylograph โดยจะแสดงผลในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการให้ความร้อนจนถึงขั้นการทำให้เย็น ซึ่งสามารถนำมาหาค่า pasting temperature ได้ แสดงผลดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลังที่มีจำหน่ายในประเทศไทย

ชนิดแป้ง	**ตรา**	**ช่วงอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน** (°C)	pasting temperature (°C)
แป้งข้าวเจ้า	โม่	66.0 – 71.0 – 75.0	88.5
	สามหก	65.5 - 71.0 - 74.5	88.5
	สุขเจริญ	66.0 – 71.0 - 74.5	86.0
	ชูถิ่น	67.0 - 72.5 - 77.0	86.0
แป้งมันสำปะหลัง	ตงจั่น	56.0 – 60.0 – 64.0	64.5
	เด็ก	55.0 - 61.5 - 65.0	65.0
	สุขเจริญ	57.0 – 60.0 - 65.0	66.5
	ชูถิ่น	56.0 - 61.0 - 65.0	65.0

ที่มา : ดัดแปลงจาก อรวรรณ เคหสุขเจริญ (2529)

Jane และคณะ (1999) ได้ศึกษาการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลังด้วย Differential Scanning Calorimeter (DSC) ซึ่งเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพในรูปฟังก์ชันกับอุณหภูมิ โดยผลการวิเคราะห์จะอยู่ในรูป thermograph ซึ่งสามารถนำมาหาค่าพลังงานในการเกิดเจลาติไนเซชันและช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งได้ แสดงดังตาราง 2.3

ตารางที่ 2.3 ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลังเมื่อวัดด้วย DSC ซึ่งเป็นค่าระหว่าง T_o ถึง T_p

ชนิดแป้ง	T_o (°C)	T_c (°C)	T_p (°C)	ΔH (J/g)
แป้งข้าวเจ้า				
- Normal rice	70.3	76.2	80.2	13.2
- Waxy rice	56.9	63.2	70.3	15.4
แป้งมันสำปะหลัง	64.3	68.3	74.4	14.7

ที่มา: ดัดแปลงจาก Jane และคณะ (1999)

แต่ในผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยว แป้งที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๋วยเตี๋ยวไม่ได้มีชนิดเดียว Obanni และ BeMiller (1997) ได้ศึกษาการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งผสม 5 ชนิด คือ common corn, wheat, normal rice, tapioca และ potato ด้วย DSC (ตารางที่ 2.4) พบว่าพลังงานในการเกิดเจลาติไนเซชันและช่วงการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งผสมบางครั้งอาจไม่ขึ้นกับชนิดและสัดส่วนของแป้งเริ่มต้นที่นำมาผสมกัน เนื่องจากการผสมแป้งต่างชนิดกันมีผลให้โครงสร้างทางเคมีของแป้งเปลี่ยนแปลงไป

ตารางที่ 2.4 ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งชนิดต่างๆและแป้งผสมเมื่อวัดด้วย DSC

ชนิดแป้ง	T_o (°C)	T_c (°C)	T_p (°C)	ΔH (J/g)
Common corn	62.9	71.2	81.8	7.5
Wheat	56.5	61.8	70.7	5.7
Normal rice	60.4	68.3	79.0	8.5
Tapioca	63.1	69.9	85.9	10.5
Potato	60.8	66.6	75.7	9.5
Common corn and potato	64.8	70.3	83.1	9.6
Wheat and tapioca	61.7	65.4	71.6	4.6
Normal rice and potato	65.1	70.9	80.8	9.5

ที่มา: ดัดแปลงจาก Obanni และ BeMiller (1997)

จากการศึกษาการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งทำให้ทราบถึงอุณหภูมิในการเกิดเจล ซึ่งนำไปใช้ในการกำหนดการให้ความร้อนของแป้งที่นำไปใช้ นอกจากนี้การศึกษาด้วยเครื่องมือบางชนิด เช่น Brabender Amylograph และ Rapid-Visco Analyser (RVA) ยังทำให้ทราบถึง heating-cooling cycle ของแป้ง ซึ่งมีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมอาหารที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ สำหรับผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวมีการนำ Brabender Amylograph และ RVA มาใช้ในการคาดคะเนคุณภาพของผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยว โดยพิมพ์เพ็ญ ถิรพร (2533) พบว่าค่าความหนืดสูงสุดของแป้งและค่าความคงตัวของแป้งจากการวัดด้วย Brabender Amylograph มีความสัมพันธ์กับคุณภาพผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยว โดยค่าความหนืดสูงสุดของแป้งมีความสัมพันธ์ทางบวกกับความเลื่อมมัน ($r = 0.819$) และความเหนียว ($r = 0.752$) ของก๋วยเตี๋ยว ส่วนความคงตัวของแป้งมีความสัมพันธ์ทางลบกับการเกาะติดกันของเส้น ($r = -0.797$) หรือกล่าวได้ว่าแป้งที่มีค่าความคงตัวสูงจะมีเนื้อสัมผัสที่แข็งนั่นเอง เช่นเดียวกัน Batey, Curtin และ Moore (1997) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านความหนืดของแป้งกับคุณภาพด้านการยอมรับของก๋วยเตี๋ยวพบว่า การยอมรับของก๋วยเตี๋ยวมีความสัมพันธ์ทางบวกกับค่า peak viscosity และค่า breakdown ($r = 0.69$ และ 0.82 ตามลำดับ) แต่มีความสัมพันธ์ทางลบกับค่า setback ($r = -0.55$) นอกจากนี้ Bhattacharya, Zee และ Corke (1999) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางด้านความหนืดของแป้งเมื่อวัดด้วย RVA กับคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของก๋วยเตี๋ยว พบว่าค่า peak viscosity, breakdown และ setback มีความสัมพันธ์กับเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวด้านความแข็งและความยืดหยุ่นของก๋วยเตี๋ยวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

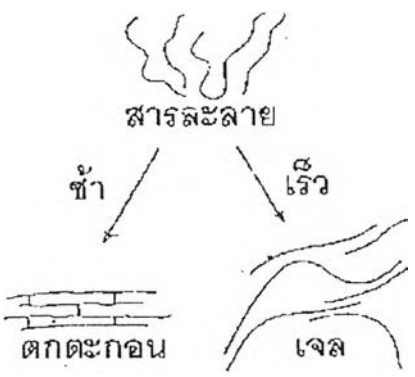
การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation)

เมื่อน้ำแป้งรับความร้อนจนมีอุณภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน เม็ดแป้งจะพองตัวเพิ่มขึ้นจนแตก โมเลกุลอะไมโลสหลุดออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็น โมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างแบบร่างแหสามมิติที่มีความข้นหนืดที่คงตัวมากขึ้น สามารถเก็บกักน้ำไว้ภายในได้ เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก (รูปที่ 2.3) เรียกว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน หรือการคืนตัว หรือ setback (Collison, 1968) ขนาดโมเลกุลของอะไมโลสที่มีบทบาทในการเกิดรีโทรเกรเดชัน คือ 100-200 หน่วยกลูโคส (Leach, 1965) เพราะถ้ามีขนาดเล็กเกินไปโมเลกุลจะมีการเคลื่อนที่อยู่เสมอ การจัดเรียงตัวใหม่เกิดได้ลำบาก การเกิดรีโทรเกรเดชันจึงเกิดยาก แต่ถ้ามีขนาดใหญ่เกินไป การเกิดรีโทรเกรเดชันจะเกิดอย่างเชื่องช้าเนื่องจากโมเลกุลเคลื่อนที่ลำบาก และการเกิดรีโทรเกรเดชันจะเกิดได้เร็วขึ้นที่อุณหภูมิต่ำและ pH เป็นกลาง ซึ่งการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งมีผลต่อเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (ณรงค์ นิยมวิทย์ และอัญชนีย์ อุทัยพัฒนาชีพ, 2528) แต่

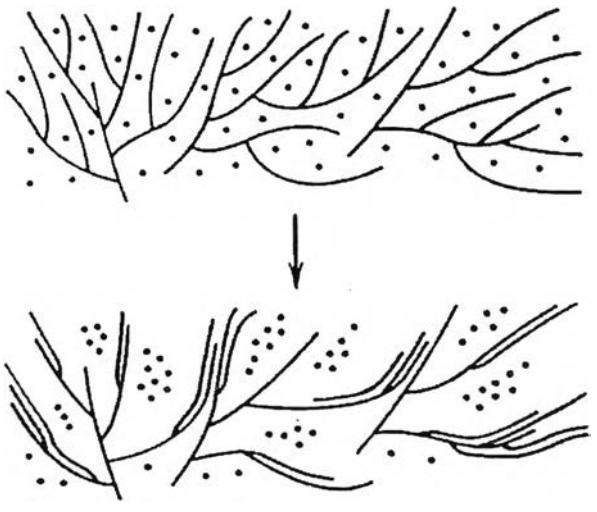
ในผลิตภัณฑ์อาหารส่วนใหญ่ที่มีการเก็บรักษานานๆการเปลี่ยนแปลงคุณภาพผลิตภัณฑ์จะเกิดเนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของอะไมโลเพกตินด้วย (รูปที่ 2.4) โดย Lima และ Singh (1993) พบว่าระหว่างการเก็บรักษา ข้าวหุงสุกจะมีความกระด้าง (firmness) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้เป็นผลโดยตรงจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง เช่นเดียวกับ Bárcenas และคณะ (2003) ซึ่งพบว่าระหว่างการเก็บรักษา เนื้อของขนมอบ (baked products) จะมีความแข็งเพิ่มขึ้น ความนุ่มของเนื้อขนมลดลง ซึ่งเกิดเนื่องจากการจับกัน (reassociation) ของสายอะไมโลเพกตินของแป้งหลังผ่านการเจลาติไนเซชันแล้ว

Perdon และคณะ (1999) ศึกษาผลของอายุการเก็บรักษาต่ออัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันและการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก 2 พันธุ์ คือพันธุ์ Bengal ซึ่งมีปริมาณอะไมโลสปานกลาง และพันธุ์ Cypress ซึ่งมีปริมาณอะไมโลสสูง พบว่าเมื่ออายุการเก็บของข้าวนานขึ้น อัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวทั้ง 2 พันธุ์จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยข้าวพันธุ์ Cypress มีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันสูงกว่าข้าวพันธุ์ Bengal เนื่องจากข้าวพันธุ์ Cypress มีปริมาณอะไมโลสเป็นองค์ประกอบสูงกว่า และการเกิดรีโทรเกรเดชันนี้มีผลให้ข้าวทั้ง 2 พันธุ์มีค่า firmness เพิ่มขึ้นและค่า stickiness ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ซึ่งส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค

อย่างไรก็ตามการเกิดรีโทรเกรเดชันนี้มีความสำคัญสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความเหนียวและมีลักษณะขุ่น เช่น ก๋วยเตี๋ยวและเส้นหมี่ (ณรงค์ นิยมวิทย์ และอัญชนีย์ อุทัยพัฒนาชีพ, 2528) โดยจะส่งผลโดยตรงต่อความเหนียวของเส้นก๋วยเตี๋ยว ยิ่งมีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันมากความเหนียวของเส้นก๋วยเตี๋ยวก็จะยิ่งสูง (เสนอ ร่วมจิตร, 2522) แต่ถ้ามากเกินไป เส้นก๋วยเตี๋ยวที่ได้จะมีลักษณะเหนียวแข็งซึ่งไม่เป็นที่ต้องการของผู้ทดสอบ (พิมพ์เพ็ญ ถิรพร, 2533)



รูปที่ 2.3 กลไกการรีโทรเกรเดชันของแป้งเนื่องจากอะไมโลส (ดัดแปลงจาก Fruton and Simmonds, 1958)



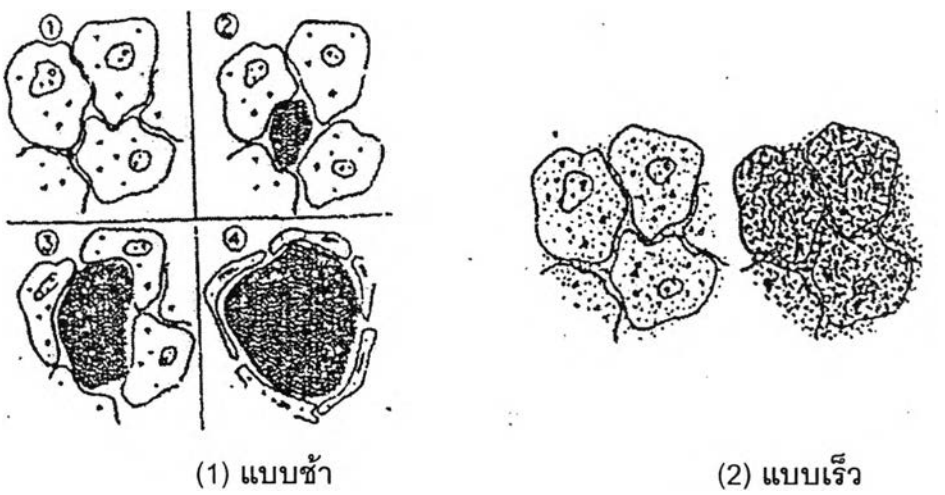
รูปที่ 2.4 กลไกการเกิดรีโทรเกรเดชันเนื่องจากอะไมโลเพกติน (Thomas, 1968)

2.3 การแช่เยือกแข็ง

การแช่เยือกแข็ง เป็นวิธีการถนอมอาหารที่มนุษย์รู้จักมาเป็นเวลานาน และนับได้ว่าเป็นการถนอมอาหารที่ให้ลักษณะและคุณค่าทางโภชนาการใกล้เคียงกับอาหารสดมากที่สุด หลักสำคัญคือ การเปลี่ยนสภาวะของน้ำในอาหารที่เป็นของเหลวให้เป็นน้ำแข็ง เพื่อมิให้น้ำนั้นสามารถทำหน้าที่ต่างๆในปฏิกิริยาเคมี และไม่เป็นสับสเตรทให้กับเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในอาหาร (สายสนม ประดิษฐดวง, 2539)

การแช่เยือกแข็งอาหารประกอบด้วยลักษณะสำคัญ 2 ส่วน คือ การลดอุณหภูมิและการเกิดผลึกของน้ำและตัวถูกละลายบางส่วน ในผลิตภัณฑ์อาหารจะมีส่วนที่เป็นน้ำ (aqueous phase) ส่วนที่เป็นของแข็งที่ละลายน้ำ และของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ (คาร์โบไฮเดรตและโปรตีนสายยาว) การเปลี่ยนแปลงขณะแช่เยือกแข็งส่วนใหญ่จะเกิดในส่วนที่เป็นน้ำซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงจากน้ำกลายเป็นน้ำแข็ง ขนาดหรือการเปลี่ยนแปลงขนาดของผลึกน้ำแข็งมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารเมื่อนำไปละลายน้ำแข็งออก ถ้าผลึกน้ำแข็งเริ่มต้นมีขนาดเล็กจะมีโอกาสในการขยายขนาดของผลึกน้ำแข็งน้อยกว่าผลึกน้ำแข็งเริ่มต้นที่มีขนาดใหญ่ (Boast, 1985) โดยทั่วไปพบว่าการแช่เยือกแข็งแบบช้าจะทำให้โมเลกุลของน้ำมีเวลามากในการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นผลึกน้ำแข็ง ผลึกที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดใหญ่และจะเกิดภายนอกเซลล์เป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่ภายในเซลล์ของเหลวยังอยู่ในสภาพเย็นยิ่งยวด (supercooling) จึงมีความดันไอสูงกว่าภายนอก ความดันไอที่ต่างกันนี้ทำให้น้ำภายในเซลล์ซึมผ่านผนังเซลล์ออกมารวม

เป็นผลึกที่ภายนอกเซลล์ เซลล์จะค่อยๆเกิดการหดตัวและเสียสภาพไปพร้อมกับการโตของผลึกน้ำแข็งภายนอก ส่วนการแช่เยือกแข็งแบบเร็วน้ำจะกลายเป็นน้ำแข็งอย่างรวดเร็ว ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็ก บาง และกระจายอย่างสม่ำเสมอทั้งภายในและภายนอกเซลล์ ความแตกต่างของความดันไอภายในและภายนอกเซลล์มีน้อย การเคลื่อนที่ของน้ำออกนอกเซลล์มีน้อย เซลล์จึงยังคงรักษารูปร่างไว้ได้ (Fennema, Poerie, and Marth, 1973; Cleland, 1990) ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งขนาดของผลึกน้ำแข็งหรือการเปลี่ยนแปลงของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นนี้จะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งเมื่อนำผลิตภัณฑ์ไปละลายน้ำแข็งออกแล้ว การวัดอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งมีหลายวิธี แต่วิธีที่เป็นที่นิยมคือการวัดความเร็วของการเกิดผิวหน้าน้ำแข็ง โดยอาศัยความเร็วของผิวหน้าน้ำแข็งที่เคลื่อนที่เข้าไปจากผิวนอกของผลิตภัณฑ์เป็นหน่วยระยะทางต่อเวลา (เซนติเมตร/ชั่วโมง) ซึ่งสามารถแบ่งอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งได้ดังตารางที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเกิดผลึกน้ำแข็งในเซลล์เนื้อเยื่อเมื่ออัตราการแช่เยือกแข็งเป็นแบบช้า (1) และแบบเร็ว (2) (Fennema *et al.*, 1973)

ตารางที่ 2.5 อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งจากวิธีการแช่เยือกแข็งที่ต่างกัน โดยใช้หลักการวัดความเร็วของการเกิดผิวหน้าน้ำแข็ง

วิธีในการแช่เยือกแข็ง	อัตราเร็วของการแช่เยือกแข็ง (เซนติเมตร/ชั่วโมง)
Ultra rapid freezing	> 10
Rapid freezing	1 - 10
Normal freezing	0.3 – 1
Slow freezing	0.1 – 0.3
Very slow freezing	< 0.1

ที่มา: Boegh-Soerensen และ Jul (1985)

กระบวนการแช่เยือกแข็ง

การแช่เยือกแข็งอาหารเป็นลักษณะการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากอาหารไปที่สารให้ความเย็น ซึ่งสารให้ความเย็นนี้อาจเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซก็ได้ขึ้นกับวิธีการแช่เยือกแข็งที่ใช้ อุปกรณ์ที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ อุปกรณ์แช่เยือกแข็งทางกล (mechanical refrigerators) ซึ่งใช้อากาศเย็น (cooled air) ของเหลวเย็น (cooled liquid) หรือผิวสัมผัสเย็น (cooled surface) เพื่อกำจัดความร้อนออกจากอาหาร และอุปกรณ์แช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิก (cryogenic freezing) ซึ่งจะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจนเหลว หรือฟรีออนเหลวให้สัมผัสอาหารโดยตรง (ธนกร โรจนกร, 2538)

การแช่เยือกแข็งที่ใช้ในงานวิจัย คือ การแช่เยือกแข็งทางกลด้วยอากาศแบบลมพ่น (Air-Blast Freezer) เป็นการนำอาหารที่อาจจะห่อหุ้มด้วยภาชนะบรรจุหรือไม่ก็ได้มาสัมผัสกับอากาศเย็นซึ่งมีระดับอุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ถึง -40 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนแบบการพาความร้อนจากอากาศสู่ผลิตภัณฑ์ และแบบการนำความร้อนระหว่างชั้นของผลิตภัณฑ์ น้ำภายในอาหารจะเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง อากาศเย็นจะเคลื่อนที่ด้วยพัดลมเป็นตัวกลางเคลื่อนที่นำความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์ ความเร็วของอากาศเย็นที่ใช้อยู่ในช่วง 0.5 ถึง 18 เมตรต่อวินาที แต่ที่นิยมใช้คือ 2-7 เมตรต่อวินาที อัตราการแช่เยือกแข็งขึ้นกับอัตราเร็วของการหมุนเวียนอากาศในเครื่องแช่เยือกแข็ง อุณหภูมิของอากาศเย็น ความหนาของชิ้นอาหาร และอุณหภูมิเริ่มต้นของชิ้นอาหาร (Karel, Fennema, and Lund, 1975) การแช่เยือกแข็งแบบนี้สามารถใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างและขนาดต่างกันได้ แต่มีข้อเสียคือ ถ้าอาหารที่ใช้ไม่มีการบรรจุหีบห่ออาจเกิดการสูญเสียน้ำได้มากจนเกิดลักษณะบกพร่องที่เรียกว่า freezer burn ขึ้นได้

นอกจากนี้ความชื้นจากอาหารจะเคลื่อนที่ไปยังอากาศ ทำให้เกิดน้ำแข็งเกาะที่ขดลวดทำความเย็นและจำเป็นต้องมีการละลายน้ำแข็งบ่อยครั้ง (ธนกร โรจนกร, 2538; Karel *et al.*, 1975)

Schoch (1968) ได้ศึกษาผลของการแช่เยือกแข็งต่อการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ พบว่า ในระหว่างการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบแป้งในผลิตภัณฑ์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงในด้านต่างๆอันมีผลต่อผลิตภัณฑ์ได้แก่ การเพิ่มความขุ่นของผลิตภัณฑ์ การเกิดโครงสร้างที่แข็งกระด้าง รวมถึงการสูญเสียน้ำในผลิตภัณฑ์เนื่องจากความสามารถในการอุ้มน้ำของแป้งในผลิตภัณฑ์ลดลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้เกิดจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งทั้งจากอะไมโลสและอะไมโลเพกติน

Chan และ Toledo (1976) ศึกษาผลของกระบวนการแช่เยือกแข็งต่อการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการอุ้มน้ำ (water-holding capacity, WHC) ของแป้งข้าวโพดที่ผ่านการเจลาติไนเซชันแล้ว จากนั้นไปแช่เยือกแข็งที่ 0 องศาฟาเรนไฮน์ และนำมาละลายที่อุณหภูมิห้อง วัดปริมาณน้ำที่แยกออกมาหลังการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งโดยใช้ Willmes presser พบว่าเมื่อลดอุณหภูมิของเจลแป้งลงความสามารถในการอุ้มน้ำจะเริ่มลดลง เนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง โดยเฉพาะเมื่อเข้าสู่ช่วงการเกิดผลึกน้ำแข็ง ความสามารถในการอุ้มน้ำของแป้งจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากระหว่างการแช่เยือกแข็งความเข้มข้นของสารละลายในอาหารจะเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันจึงเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในช่วงใกล้จุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์ซึ่งถือว่าเป็นช่วงการเกิดรีโทรเกรเดชันสูงที่สุด และในช่วงนี้เป็นช่วงการเกิดของผลึกน้ำแข็ง โครงสร้างบางส่วนของเจลแป้งจะถูกทำลายไป ความสามารถในการอุ้มน้ำของโครงสร้างเจลจึงลดลงอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อน้ำได้กลายเป็นผลึกน้ำแข็งจนหมดแล้วการเปลี่ยนแปลงต่างๆจะเริ่มคงที่

Yan (1977) ศึกษาการแช่เยือกแข็งข้าวหุงสุก(*Calrose* rice) ด้วยการแช่เยือกแข็งแบบลมพ่น ระบบแผ่นสัมผัส (contact plate) และในตู้แช่เยือกแข็ง (still air) อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส พบว่า วิธีการแช่เยือกแข็งที่ต่างกันไม่มีผลต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านการยอมรับของผู้ทดสอบ

Olalquiag, Guinard และ Singh (1986) ได้ศึกษาผลของการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพของข้าวหุงสุกโดยใช้ข้าวสเปน 3 พันธุ์ นำไปแช่เยือกแข็งโดยวิธีระบบลมพ่น (air-blast) และใช้ไนโตรเจนเหลว (cryogenic) พบว่า วิธีการแช่เยือกแข็งที่ต่างกันไม่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพ เนื้อสัมผัส และการยอมรับของผู้ทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และผลิตภัณฑ์มีคุณภาพทัดเทียมกับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง

Lee และ Singh (1991) ศึกษาผลของการแช่เยือกแข็งต่อการเปลี่ยนแปลงด้านเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก (California cooked rice) เมล็ดสั้นและเมล็ดยาว ด้วยการแช่เยือกแข็งแบบ

ลมพ่นที่อุณหภูมิ -34 องศาเซลเซียส ในตู้แช่เยือกแข็งอุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส และการใช้ไนโตรเจนเหลว พบว่ากระบวนการแช่เยือกแข็งมีผลให้ข้าวหุงสุกมีค่า hardness เพิ่มขึ้น และ stickness ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยการแช่เยือกแข็งด้วยไนโตรเจนเหลวมีผลให้ค่า hardness ของข้าวเมล็ดยาวเพิ่มขึ้นสูงที่สุดและค่า stickness ลดลงมากที่สุด แต่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของข้าวเมล็ดสั้นน้อยกว่าการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีอื่น

วไลลักษณ์ พัฒนมุข (2539) ได้วิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวอบหมูแดงแช่เยือกแข็ง โดยเปรียบเทียบการแช่เยือกแข็งระบบลมพ่นกับระบบแผ่นสัมผัส พบว่าวิธีการแช่เยือกแข็งที่ต่างกันไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแตกต่างกันทั้งสมบัติทางกายภาพและทางประสาทสัมผัส และไม่แตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง เช่นเดียวกับรัชนี ศรีวรรณวิทย์ (2541) ซึ่งได้ศึกษาการผลิตข้าวผัดกุ้งแช่เยือกแข็งโดยทำการทดลองเช่นเดียวกันและพบว่าให้ผลเช่นเดียวกัน

สุภัทรา เขมาสิทธิ์ และอาทิตยา พันธุวัฒนา (2539) ศึกษาผลของวิธีการแช่เยือกแข็งต่อการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์อาหารว่าง 2 ชนิดคือ ขนมจีบและค้าวคาวเผือกด้วยวิธีการแช่เยือกแข็งแบบลมพ่นและไนโตรเจนเหลว พบว่าการแช่เยือกแข็งแบบลมพ่นส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ทั้งสองมีค่า freezing loss และจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด/กรัมของผลิตภัณฑ์สูงกว่าการแช่เยือกแข็งโดยใช้ไนโตรเจนเหลว แต่การแช่เยือกแข็งที่ต่างกันไม่มีผลต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านสี เนื้อสัมผัส ความชุ่มน้ำ รสชาติ และกลิ่นของขนมจีบ แต่มีผลต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านความชุ่มน้ำของค้างคาวเผือกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

Cauvain (1998) พบว่า อัตราการแช่เยือกแข็งที่รวดเร็วจะช่วยรักษาความนุ่มของเค้ก ลดการสูญเสียโครงสร้างและการเกิด water migration ของเค้กได้ เนื่องจากการแช่เยือกแข็งที่รวดเร็ว ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กกว่า การทำลายโครงสร้างเนื่องจากการผลึกน้ำแข็งจึงมีน้อยกว่า

2.4 การเก็บรักษาในสภาพแช่เยือกแข็ง

วิธีการแช่เยือกแข็งที่ดีและเหมาะสมเพียงอย่างเดียวจะไม่ช่วยให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งดีที่สุดได้ เพราะผลิตภัณฑ์จะต้องนำมาเก็บรักษาไว้ก่อนจะส่งจำหน่ายถึงผู้บริโภค การเก็บรักษาไว้ในสภาพที่ไม่เหมาะสมมีผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ลดลง โดยทั่วไปการเก็บรักษาอาหารแช่เยือกแข็งจำเป็นต้องเก็บในห้องที่มีระดับความเย็นเหมาะสม มีฉนวนป้องกันเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิของห้องให้คงที่อยู่ตลอดเวลา ควรมีอุณหภูมิต่ำในระดับที่แน่ใจได้ว่าจุลินทรีย์ที่ปะปนมาจะหยุดการทำงานโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆเกิดขึ้นกับอาหาร

และแยกจากห้องที่ใช้แช่แข็ง โดยปกติห้องเก็บจะมีอุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า (สายสนม ประดิษฐดวง, 2539)

Cauvain (1998) ศึกษาการปรับปรุงการเกิด staling ของผลิตภัณฑ์ขนมเค้กแช่เยือกแข็ง พบว่าปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออายุการเก็บรักษาของขนมเค้กแช่เยือกแข็งในระหว่างการเก็บรักษาคือการเติบโตของผลึกน้ำแข็ง ซึ่งมีผลในการทำลายโครงสร้างภายในของเค้ก เมื่อนำมาละลายน้ำแข็ง เนื้อสัมผัสของเค้กจะเสียไป

Bárcenas และคณะ (2003) ศึกษาผลของกระบวนการแช่เยือกแข็งและการเก็บรักษาต่อการเกิด staling ของ part-baked bread ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นที่อุณหภูมิ -35 องศาเซลเซียส นาน 105 นาที เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นาน 7, 14, 28 และ 42 วัน นำมาละลายที่อุณหภูมิห้อง และอบที่ 195 องศาเซลเซียส นาน 14 นาที ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง และวัดการเพิ่มของ crumb hardness โดยใช้ Texture Analyser TA-XT2i พบว่า กระบวนการแช่เยือกแข็งมีผลทำให้เนื้อขนมปัง (crumb) มีความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อขนมปังที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็ง และระยะเวลาในการเก็บรักษาจะมีผลทำให้เนื้อ (crumb) ขนมปังมีความแข็งเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากขนมปังที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและการละลายน้ำแข็ง ต้องผ่านช่วงการเกิดรีโทรเกรเดชันสูงที่สุดถึง 2 ช่วง คือ ช่วงการแช่เยือกแข็งและช่วงการละลายน้ำแข็ง (การเกิด staling จะเกิดได้ดีที่สุดช่วงอุณหภูมิใกล้จุดเยือกแข็งคือประมาณ -1.7 ถึง -2.8 องศาเซลเซียส) และเกิดการทำลายโครงสร้างของแป้งเนื่องจากการเกิดผลึกน้ำแข็งด้วย

2.5 การละลายผลึกน้ำแข็ง

การละลายผลึกน้ำแข็งเป็นขั้นตอนที่ค่อนข้างซับซ้อน และเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์อาหารมีแนวโน้มที่จะเกิดการเสื่อมเสียเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี กายภาพ และจุลินทรีย์ (Karel *et al.*, 1975) เนื่องจากอัตราการละลายน้ำแข็งของตัวอย่างอาหารที่เป็นของแข็งจะช้ากว่าอัตราการแช่เยือกแข็ง และความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างการละลายจะมีค่าน้อยกว่าในระหว่างการแช่เยือกแข็ง ซึ่งการละลายน้ำแข็งอย่างรวดเร็วจะลดการเสื่อมเสียดังกล่าวได้

วิธีการละลายน้ำแข็งมีอยู่ 2 หลักการ คือการนำความร้อนจากผิวไปสู่ภายในผลิตภัณฑ์ โดยให้ผิวของผลิตภัณฑ์สัมผัสกับแหล่งความร้อน เช่น แผ่นโลหะความร้อน อากาศร้อน น้ำอุ่น หรือไอน้ำ และการสร้างความร้อนให้เกิดขึ้นภายในผลิตภัณฑ์โดยใช้วิธีไดอิเลคตริกหรือไมโครเวฟ (IIR, 1972)

2.5.1 การละลายน้ำแข็งด้วยวิธีให้ความร้อนที่ผิวของผลิตภัณฑ์

การละลายน้ำแข็งโดยวิธีนี้สามารถใช้ตัวกลางในการให้ความร้อนได้หลายรูปแบบ ได้แก่ อากาศนิ่ง (still air) อากาศที่มีการเคลื่อนที่ (moving air) น้ำ ไอน้ำ (Fennema *et al.*, 1973) และสามารถลดระยะเวลาการละลายน้ำแข็งได้โดยการลดขนาดของผลิตภัณฑ์ เพิ่มความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวของผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งและสภาพแวดล้อม หรือการเพิ่มการเคลื่อนที่ของตัวกลางในสภาพแวดล้อมให้เร็วกว่าผลิตภัณฑ์ แต่ต้องมีการควบคุมไม่ให้อุณหภูมิสภาพแวดล้อมสูงจนเกินไปเพราะอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านสีหรือรูปร่างในผลิตภัณฑ์บางชนิดได้ (Fennema *et al.*, 1973; Boegh-Soerensen and Jul, 1985)

2.5.2 การละลายน้ำแข็งด้วยวิธีทำให้เกิดความร้อนภายในผลิตภัณฑ์

วิธีนี้ทำให้เกิดความร้อนโดยให้สนามไฟฟ้าเข้าไปภายในผลิตภัณฑ์ ซึ่งก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าที่อยู่ภายใน โมเลกุลของผลิตภัณฑ์จะเกิดความร้อนและทำให้อาหารมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยความร้อนที่เกิดจะเกิดจากจุดซึ่งอาหารสัมผัสกับไมโครเวฟแล้วจึงกระจายตัวออกไปสู่ส่วนอื่น (สายสนม ประดิษฐดวง, 2539) ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสมบัติทางไฟฟ้าของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด การละลายน้ำแข็งด้วยวิธีนี้สามารถลดเวลาลงเหลือเพียงไม่กี่นาที แต่ในระหว่างการละลายน้ำแข็งอัตราการให้ความร้อนจะเพิ่มขึ้นซึ่งอาจเป็นปัญหากับผลิตภัณฑ์ได้ และถ้าผลิตภัณฑ์ไม่ได้มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันและไม่สม่ำเสมอ ความร้อนที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของผลิตภัณฑ์จะต่างกัน เช่น บางส่วนอาจเกิดความร้อนมากเกินไป (Fennema *et al.*, 1973; Carroll, 1989)

Varavinit, Anuntavuttikul และ Shobsngob (2000) ศึกษาผลของการแช่เยือกแข็งและวิธีการละลายน้ำแข็งต่อความเสถียรของเจลแป้งสาคูและแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้การแช่เยือกแข็งในตู้แช่เยือกแข็งอุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส และแบบ Cryogenic Quick Freezing (CQF) และนำมาละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิต่างๆคือ 30, 60, 90 องศาเซลเซียส และใช้ไมโครเวฟ พบว่าเจลแป้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบ CQF จะมี %syneresis ต่ำกว่าการแช่เยือกแข็งที่ -18 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิในการละลายสูงขึ้น %syneresis มีค่าลดลง การละลายในไมโครเวฟจะมี %syneresis ต่ำกว่าการละลายในน้ำที่อุณหภูมิ 30 และ 60 องศาเซลเซียส แต่สูงกว่าการละลายที่ 90 องศาเซลเซียส ต่อมา Varavinit และคณะ (2002) ได้ศึกษาผลของสภาวะในการแช่เยือกแข็งและการละลายน้ำแข็งต่อความเสถียรของเจล แป้งจากแป้งข้าวโดยใช้การแช่เยือกแข็งในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส และแบบ CQF นำมาละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิต่างๆคือ 30, 60 และ 90 องศาเซลเซียส พบว่า เจลแป้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบ CQF จะมี %syneresis ต่ำกว่าและมีเนื้อสัมผัสที่ดีกว่าการแช่เยือกแข็งที่ -18 องศาเซลเซียส เนื่องจากการแช่เยือกแข็งที่รวดเร็วจะเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็ก ความเสียหายของ

โครงสร้างของเจลเนื่องจากผลึกน้ำแข็งมีน้อย และการเกิดรีโทรเกรเดชันลดลงเนื่องจากสายโมเลกุลอะไมโลสไม่มีเวลาเพียงพอที่จะเคลื่อนที่มาจับกัน และเมื่ออุณหภูมิในการละลายสูงขึ้น %syneresis มีค่าลดลงเนื่องจากโมเลกุลของแป้งที่เกิดการเรียงตัวกันใหม่ช่วงที่เจลแป้งเย็นตัวลงสามารถละลายได้ดีขึ้น และการละลายที่อุณหภูมิสูงจะช่วยให้เจลแป้งผ่านช่วงวิกฤติของการเกิดรีโทรเกรเดชันอย่างรวดเร็ว %syneresis จึงมีค่าลดลงและเนื้อสัมผัสของเจลที่ได้จะเรียบเนียนขึ้น โดยเฉพาะเมื่อแช่เยือกแข็งโดยวิธี CQF และละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ลักษณะปรากฏของเจลที่ได้ไม่แตกต่างกับก่อนการแช่เยือกแข็ง

สมจิต ประภาเลิศรัศมี (2539) ศึกษาผลของการแช่เยือกแข็ง การเก็บรักษา และวิธีการละลายน้ำแข็งต่อคุณภาพของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง 2 พันธุ์ คือข้าวขาวและข้าวหอมมะลิ โดยการแช่เยือกแข็งแบบลมพ่นและการใช้ไนโตรเจนเหลว เก็บรักษาผลิตภัณฑ์ข้าวหุงสุกไว้ที่อุณหภูมิควบคุมและอุณหภูมิที่มีความแปรปรวน และอุ่นด้วยการนึ่งและการใช้ไมโครเวฟ พบว่าวิธีการแช่เยือกแข็งและวิธีการอุ่นที่ต่างกันไม่มีผลต่อคะแนนทางประสาทสัมผัสทุกด้านของข้าวหุงสุกที่ทำการทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) และไม่แตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง แม้ว่าสีของข้าวที่ใช้ไมโครเวฟอุ่นจะมีสีคล้ำกว่าก็ตาม และเมื่อนำผลิตภัณฑ์เก็บที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นาน 3 เดือน พบว่า ข้าวที่ผ่านการแช่เยือกแข็งโดยวิธีไนโตรเจนเหลวจะมี %weight loss, %ข้าวสุกหัก, การเปลี่ยนแปลงของสีข้าว และการเปลี่ยนแปลงด้านเนื้อสัมผัสน้อยกว่าการแช่เยือกแข็งแบบลมพ่น แต่คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสทุกด้านยังคงไม่แตกต่างกัน และความแปรปรวนของอุณหภูมิในการเก็บรักษามีผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางประสาทสัมผัสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$) โดยมีผลให้ข้าวหุงสุกเกิดการแตกหัก การเปลี่ยนแปลงของสีและเนื้อสัมผัสมากกว่าการเก็บที่อุณหภูมิคงที่ และคะแนนการยอมรับทางประสาทลดลง

2.6 ความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็ง

ความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็ง (freeze-thaw stability) หมายถึง การที่อาหารยังคงมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) โดยไม่มีลักษณะเป็นก้อน (lumpy) เป็นเม็ด (grainy) หรือมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ (spongy) และปราศจากของเหลวแยกตัวออกมา (syneresis) อย่างน้อย 4 รอบการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็ง (Richardson, 1988) อาหารแช่เยือกแข็งส่วนใหญ่จะผ่านการแช่เยือกแข็งและละลายน้ำแข็งสลับกันหลายๆครั้ง อาจเกิดเป็นรอบสั้นๆในระหว่างการเก็บรักษาหรือขนส่ง บางครั้งไม่ได้เกิดการละลายอย่างสมบูรณ์ทั้งหมดแต่อาจเกิดเป็นจุดๆเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน (Light, 1990) ในระบบน้ำแป้ง (starch-water

system) ระหว่างการแช่เยือกแข็ง น้ำในน้ำเจลแป้งจะกลายเป็นน้ำแข็ง ความเข้มข้นของระบบจะเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นการเร่งการรวมตัวกัน (association) ของสายโมเลกุลอะไมโลส โดยการรวมตัวกันอาจเกิดอย่างถาวรหรือผันกลับก็ได้ ถ้าการรวมตัวกันของสายโมเลกุลอะไมโลสผันกลับได้เมื่อทำการละลายน้ำแข็ง แสดงว่า แป้งนั้นมีความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็ง (Richardson, 1988) การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งหลายๆครั้งจะเป็นการทำลายเนื้อสัมผัสเนื่องจากการขยายขนาดของผลึกน้ำแข็ง แป้งที่ประกอบด้วยอะไมโลเพกตินสูงหรือเกือบทั้งหมดจะมีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งมากกว่าแป้งที่มีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบเนื่องจากสมบัติของโมเลกุลอะไมโลเพกตินที่มีกิ่งก้านมาก อย่างไรก็ตามก็ยังคงพบการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสในผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็ง (Light, 1990)

Varavinit และคณะ (2000) ได้ศึกษาผลของการแช่เยือกแข็งและการละลายน้ำแข็งซ้ำต่อความเสถียรของเจลแป้งสาคูและแป้งมันสำปะหลัง พบว่าเจลแป้งมันสำปะหลังมีความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งสูงกว่าเจลแป้งสาคู เนื่องจากแป้งสาคูมีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง ต่อมา Varavinit และคณะ (2002) ได้ศึกษาผลของสภาวะในการแช่เยือกแข็งและการละลายน้ำแข็งซ้ำต่อเสถียรของเจลแป้งจากแป้งข้าวพันธุ์ต่างๆ 3 พันธุ์ คือ Amylose rice flour, Jasmine rice flour และ Waxy rice flour พบว่าให้ผลในทิศทางเดียวกันคือ เจลของ amylose rice flour มีความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งต่ำที่สุด คือมี %syneresis สูงที่สุด และมีการเปลี่ยนแปลงจากเนื้อสัมผัสที่เรียบเนียน (smooth gel) เป็นเนื้อสัมผัสที่มีรูพรุน (rough-textured porous) ควบคู่กับการเกิดโครงสร้างที่คล้ายฟองน้ำ (sponge-like structure) เนื่องจาก amylose rice flour มีปริมาณอะไมโลสเป็นองค์ประกอบสูงรองลงมาคือ Jasmine rice flour ในขณะที่แป้ง waxy rice flour ไม่พบ %syneresis ในทั้ง 4 รอบของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็ง ซึ่งการเกิด %syneresis และการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสของเจลแป้งนี้เกิดจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งและเกิดเนื่องจากแป้งนั้นไม่มีความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งนั่นเอง