บทที่ 1

บทนำต้นเรื่อง

ภาวะสังคมปัจจุบันมีผู้บริโภคต้องการอาหารที่อำนวยความสะดวกสบายและความรวดเร็วในการเตรียมและการบริโภคอาหาร การเก็บรักษาอาหารโดยการแช่เยือกแข็งอย่างถูกต้องและเหมาะสมจะช่วยรักษาคุณภาพทั้งรูป กลิ่น รส สี และคุณภาพทางโภชนาการไว้ได้มากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งพร้อมบริโภคที่สนองตอบความต้องการของผู้บริโภค ในการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์อาหารชนิดต่างๆ สามารถใช้กับอาหารที่ผ่านการให้ความร้อนอย่างสมบูรณ์หรือใช้กับอาหารสดที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมเท่านั้น คุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็ง จึงขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดของผลิตภัณฑ์ ความต้องการของผู้บริโภค เป็นต้น วิธีการแช่เยือกแข็งอาหารจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถเก็บรักษาอาหารไว้ได้นานหากมีการดำเนินการเก็บรักษาอย่างถูกวิธี ปัจจุบันอาหารแช่เยือกแข็งจึงเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปโดยเฉพาะในกลุ่มประเทศพัฒนาและจัดเป็นสินค้าสำคัญประเภทหนึ่งในตลาดโลกที่ยังมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง (สายสนม ประดิษฐดวง, 2540)

กะหรี่ปั๊ปเป็นอาหารว่างชนิดหนึ่งที่สามารถสร้างรายได้แก่ผู้ประกอบการ เนื่องจากกะหรี่ปั๊ปเป็นอาหารที่รับประทานสะดวก จัดจำหน่ายได้ง่าย มีหลายรสชาติให้เลือกรับประทาน และต้นทุนในการผลิตไม่สูงมากนัก (นวรัตน์ เอี่ยมพิทักษ์กิจ, ม.ป.ป.) สามารถผลิตได้ทั้งในระดับครัวเรือนจนถึงระดับอุตสาหกรรม ในการผลิตในระดับอุตสาหกรรมสามารถผลิตกะหรี่ปั๊ปได้เป็นจำนวนมาก ซึ่งทำให้สามารถกระจายสินค้าได้อย่างทั่วถึงทั้งภายในประเทศและส่งออกไปจำหน่ายยังประเทศต่างๆ ได้ แต่อายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์สั้น ดังนั้นจึงควรศึกษาแนวทางและวิธีการเก็บรักษากะหรี่ปั๊ป เพื่อให้สามารถเก็บรักษาได้นานขึ้นและคงคุณภาพตามที่ต้องการ ซึ่งวิธีการแช่เยือกแข็งเป็นวิธีการที่มีศักยภาพในการยืดอายุการเก็บรักษาคุณภาพกะหรี่ปั๊ปที่น่าสนใจ

ตรวจเอกสาร

1. ผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊ป

1.1 ลักษณะทั่วไป

กะหรี่ปั๊ปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารชนิดหนึ่ง มีลักษณะคล้ายกับฟัฟเพสตรี ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทเบเกอรี่ เปลือกของกะหรี่ปั๊ปมีลักษณะไม่ขึ้นฟูและมีหลายชั้นซ้อนกัน ทำหน้าที่ห่อหุ้มไส้ชนิดต่างๆ การเกิดลักษณะเป็นชั้นบางๆ ซ้อนกัน เกิดขึ้นเนื่องจากการรีดและพับทบแป้งหลายๆ ครั้ง แล้วนำไปผ่านความร้อน ไอน้ำซึ่งอยู่ระหว่างชั้นแป้งช่วยทำให้เปลือกของกะหรี่ปั๊ปเกิดลักษณะเป็นชั้นชัดเจน (จิตธนา แจ่มเมฆ และอรอนงค์ นัยวิกุล, 2544; Morris and Rose, 1996)

1.2 ส่วนประกอบและหน้าที่ในผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊ป

1.2.1 แป้งสาลี เป็นส่วนประกอบสำคัญในการทำผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ ซึ่งมีคุณสมบัติหลักคือการให้โครงร่างแก่ผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ แป้งสาลีสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด (จิตธนา แจ่มเมฆ และคณะ, 2540; นวรัตน์ เอี่ยมพิทักษ์กิจ, ม.ป.ป.) ดังนี้

- แป้งขนมปัง มีโปรตีนสูงประมาณร้อยละ 12-14 ใช้สำหรับทำขนมปังทั่วๆไป
- แป้งอเนกประสงค์ มีโปรตีนสูงประมาณร้อยละ 10-11 ใช้สำหรับทำเพสตรี คุกกี้ และกะหรี่ปั๊ป แป้งอเนกประสงค์เป็นแป้งที่ได้จากการผสมข้าวสาลีชนิดแข็งกับชนิดอ่อนเข้าด้วยกันในอัตราส่วนที่เหมาะสม
- แป้งเค้ก มีโปรตีนต่ำประมาณร้อยละ 7-9 ใช้สำหรับทำเค้ก

องค์ประกอบสำคัญของแป้งสาลีที่มีผลต่อคุณสมบัติและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2538) คือ

1.2.1.1 สตาร์ช

โมเลกุลของสตาร์ชประกอบด้วยอะไมโลสและอะไมโลเพกติน สัดส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินมีผลต่อคุณสมบัติของแป้ง แป้งที่มีอะไมโลเพกตินสูงเมื่อผ่านความร้อนจะเหนียวและเกาะตัวมากกว่าแป้งที่มีอะไมโลเพกตินต่ำ (ชลลดา ปรีดา, 2539) โดยปกติเม็ดสตาร์ชจะไม่ละลายในน้ำเย็น แต่เมื่อให้ความร้อนเม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำเข้าไปจนพองตัวจนแตกออก ทำให้เกิดความข้นหนืด เรียกว่า เจลาติไนเซชัน เมื่อสตาร์ชมีอุณหภูมิลดลง

1.2.1.2 โปรตีน

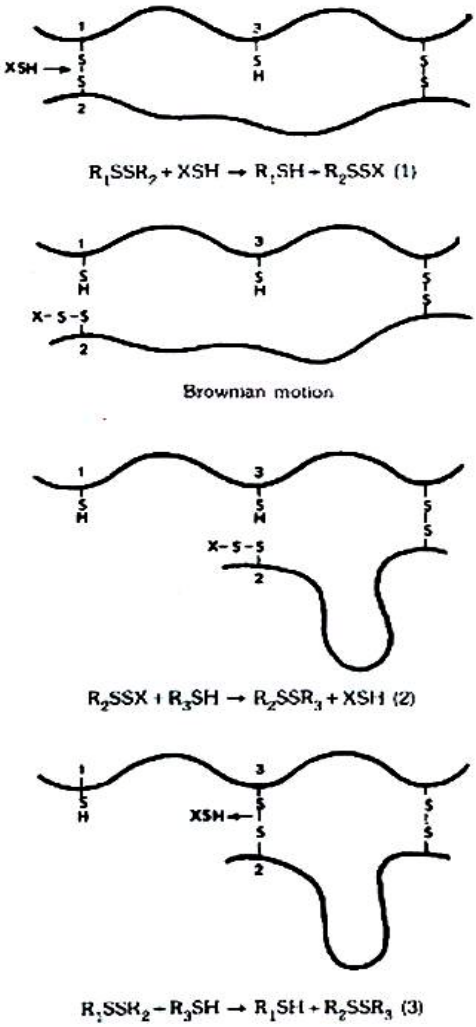
แป้งสาลีมีโปรตีนที่สำคัญ คือ ไกลอะดีน (gliadin) และกลูเตนิน (glutenin) ซึ่งเป็นโปรตีนที่สามารถละลายในแอลกอฮอล์ และกรดหรือเบส ตามลำดับ (Godon and Willm, 1994) โดยโปรตีนทั้งสองชนิดนี้มีปริมาณใกล้เคียงกัน เมื่อนำแป้งสาลีมาผสมกับน้ำในปริมาณที่เหมาะสม แล้วนวดจะได้โดที่มีความคงตัวและมีความยืดหยุ่น เนื่องจากทำให้น้ำสามารถจับกับโมเลกุลของโปรตีนเกิดร่างแหสามมิติ เรียกว่า กลูเตน (Tilley *et al*., 2001) ซึ่งพันธะที่ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวทางเคมีระหว่างกรดอะมิโนภายหลังการนวด ได้แก่ พันธะไฮโดรเจน พันธะไอออนิก พันธะไดซัลไฟด์ พันธะไฮโดรฟิลิก และพันธะไฮโดรโฟบิก (Pomeranz, 1991; Giannou *et al*., 2003)

พันธะไดซัลไฟด์ (disulfide linkage) เป็นพันธะโควาเลนต์ระหว่างซัลเฟอร์ของกรดอะมิโนซิสทีนในโมเลกุล ซึ่งเป็นพันธะที่มีความสำคัญต่อความยืดหยุ่นของกลูเตน พันธะนี้สามารถเคลื่อนที่ได้เรียกการเคลื่อนที่นี้ว่า การเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian motion) (ดังภาพที่ 1) ไกลอะดีนและกลูเตนินมีพันธะไดซัลไฟด์เหมือนกัน แต่พันธะของไกลอะดีนส่วนใหญ่จะเชื่อมกันภายในโมเลกุล (intramolecular bonding) ขณะที่กลูเตนินมีพันธะเชื่อมทั้งภายนอก (intermolecular bonding) และภายในโมเลกุล (Kokini *et al*., 1994) เนื่องจากองค์ประกอบของกรดอะมิโนที่เรียงลำดับในสายโพลิเปปไทด์ต่างกัน (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2540)

1.2.2 ลิปิด เป็นสารประกอบประเภทเอสเทอร์ซึ่งประกอบด้วย กรดไขมัน 3 โมเลกุล และกลีเซอรอล 1 โมเลกุล เรียกว่า ไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) หรือไตรเอซิลกลีเซอรอล (triacylglycerol) ไตรกลีเซอไรด์ที่มีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง เรียกว่า ไขมัน ถ้ามีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง เรียกว่า น้ำมัน ลิปิดที่ถูกตรึงในโครงสร้างโปรตีนเป็นสิ่งจำเป็นในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างการผสมโด โดยทำให้เกิดความหนืดและความยืดหยุ่น (viscoelastic) ของกลูเตน (Giannou *et al*., 2003)

นอกจากนี้ ลิปิดยังมีส่วนสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางด้านลักษณะเนื้อสัมผัส เช่น ลิปิดทำให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อสัมผัสนุ่มและสามารถเก็บรักษาได้นานขึ้น โดยทำให้อัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันลดลง รวมทั้งทำให้ผลิตภัณฑ์มีกลิ่นรสที่ดี Gassenmeier และ Schieberle (1994) กล่าวว่า ไขมันอาจมีอิทธิพลต่อกลิ่นรสของเพสตรี คือ ไขมันอาจให้กลิ่นโดยตรงหรืออาจจะเป็นสิ่งที่เหนี่ยวนำทำให้เกิดกลิ่น โดยจะปลดปล่อยสารประกอบของกลิ่นในระหว่างการให้ความร้อน นอกจากนี้ไขมันยังมีผลให้แป้งนุ่มและร่วนเป็นชั้น โดยอาหารที่

ทำด้วยแป้ง เช่น ขนมเค้ก กะหรี่ปั๊ป เป็นต้น ถ้าไม่ผสมไขมัน กลูเตนซึ่งเกิดจากโปรตีนในแป้งรวมตัวกับน้ำจะเกาะกันเหนียวและแน่น แต่ถ้าผสมไขมันแล้ว ไขมันจะเข้าไปแทรกระหว่างเส้นใยกลูเตน และบางส่วนจะทำให้เส้นใยกลูเตนขาด จึงทำให้เนื้อแป้งของผลิตภัณฑ์ไม่แน่น เช่น ในผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊ปและพาย ไขมันที่แทรกเป็นหยดขนาดใหญ่อยู่ระหว่างชั้นของกลูเตน จึงทำให้ขนมนุ่ม ร่วน และเป็นชั้น เมื่อมีการพับและทบหลายๆ ครั้ง (ศศิเกษม ทองยงค์ และพรรณี เดชกำแหง, 2530)



$R_1SSR_2 + XSH \rightarrow R_1SH + R_2SSX$ (1)

$R_2SSX + R_3SH \rightarrow R_2SSR_3 + XSH$ (2)

$R_1SSR_2 + R_3SH \rightarrow R_1SH + R_2SSR_3$ (3)

ภาพที่ 1 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการเคลื่อนย้ายพันธะไดซัลไฟด์ของกลูเตน

The changing structure and moving disulfide bond of guten.

Source: Onanong naiyawikul (2538)

1.2.3 น้ำ เป็นส่วนผสมที่มีความจำเป็นซึ่งอาจไม่อยู่ในรูปน้ำโดยตรง แต่อยู่ในลักษณะของของเหลวอื่น โดยน้ำเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายที่ดี เนื่องจากเกาะเกี่ยวด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้เกิดการกระจายตัวและละลายสารทั้งประเภทอินทรีย์และอนินทรีย์ที่มีอยู่กับสารที่ละลายในน้ำนั้น (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2538) หน้าที่ของน้ำได้แก่

1. ทำให้เกิดกลูเตน
2. น้ำช่วยควบคุมความหนืดของโด
3. น้ำทำให้สตาร์ชเปียกและเกิดเจลได้

1.2.4 น้ำตาล เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นผลึก ละลายน้ำและมีรสหวาน จัดอยู่ในอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรท น้ำตาลที่ใช้ในกะหรี่ปั๊ป หมายถึง น้ำตาลซูโครส ซึ่งมีหลายชนิด ได้แก่ น้ำตาลทรายบริสุทธิ์และน้ำตาลทรายแดง ในการทำกะหรี่ปั๊ปต้องใช้น้ำตาลทรายที่มีขนาดเล็กและควรมีสีขาว เพราะจะผสมเข้ากับส่วนผสมอื่นๆได้ดี ถ้าน้ำตาลที่ใช้มีขนาดผลึกใหญ่และหยาบจะผสมกับได้ไม่ดี และจะละลายไม่หมด มีผลให้ผิวของผลิตภัณฑ์เป็นจุด น้ำตาลมีหน้าที่ (จิตธนา แจ่มเมฆ และอรอนงค์ นัยวิกุล, 2544; นวรัตน์ เอี่ยมพิทักษ์กิจ, ม.ป.ป.; Pomeranz, 1991)

1. ให้ความหวานและกลิ่นรสแก่ผลิตภัณฑ์
2. ทำให้สีก่อตัวที่ผิวของผลิตภัณฑ์ได้อย่างรวดเร็ว เพราะเกิดคาราเมลไลเซชันและปฏิกิริยาเมลลาร์ด
3. ช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีความชุ่มชื้นและเก็บได้นาน เพราะธรรมชาติของน้ำตาลจะดูดความชื้น
4. เพิ่มคุณค่าทางอาหาร

1.2.5 เกลือ เป็นส่วนผสมที่จำเป็น เนื่องจากคุณสมบัติที่สำคัญ (จิตธนา แจ่มเมฆ และอรอนงค์ นัยวิกุล, 2544; Giannou *et al*., 2003) คือ

1. ช่วยปรับปรุงกลิ่นรส
2. ทำให้กลูเตนแข็งแรงและยืดหยุ่นเหมาะสม
3. ช่วยป้องกันจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการ
4. ช่วยยับยั้งเอนไซม์โปรติเอสในแป้ง ถ้าไม่เติมเกลือจะทำให้โดเหนียวเหนอะหนะ และขึ้นรูปยาก

2. การแช่เยือกแข็ง

การแช่เยือกแข็งเป็นกรรมวิธีที่ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาและป้องกันการเสื่อมเสียได้ เนื่องจากการแช่เยือกแข็งมีผลให้อุณหภูมิของอาหารหรือผลิตภัณฑ์นั้นลดต่ำลงกว่าจุดเยือกแข็งของอาหารและเปลี่ยนสถานะของน้ำไปเป็นผลึกน้ำแข็ง ผลจากการเพิ่มความเข้มข้นของตัวทำละลายในน้ำที่ยังไม่แข็งตัวจะทำให้ค่าวอเตอร์แอกทิวิตีของอาหารลดลง อุณหภูมิที่ใช้เก็บรักษาขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์ การแช่เยือกแข็งมีผลให้ชะลอการเจริญเติบโตจุลินทรีย์ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังลดกระบวนการทางเมตาบอลิซึม ปฏิกิริยาของเอนไซม์ และปฏิกิริยาเคมีที่ไม่ต้องการ หลักสำคัญ คือการเปลี่ยนสภาวะของน้ำในอาหารให้เป็นผลึกน้ำแข็ง เพื่อป้องกันมิให้น้ำสามารถทำหน้าที่ต่างๆ ในปฏิกิริยาเคมีและไม่เป็นซับสเตรทให้กับจุลินทรีย์ที่ปะปนมากับอาหารได้

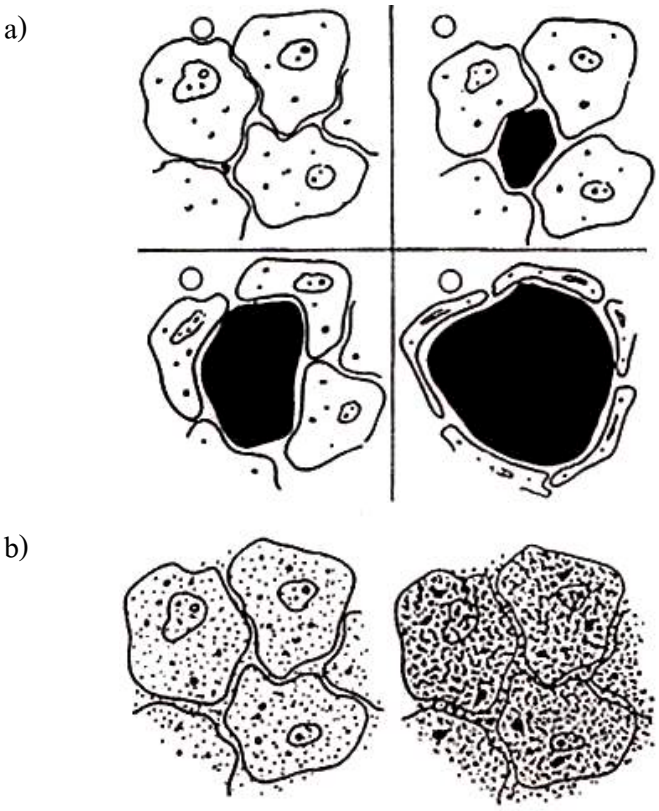
ในอุตสาหกรรมอาหารแช่เยือกแข็ง การแช่เยือกแข็งด้วยระบบพ่นลมเย็น (air-blast freezing) เป็นวิธีที่ถูกต้องตามหลักเศรษฐกิจที่สุด โดยผลิตภัณฑ์ที่นำมาแช่เยือกแข็งมีภาชนะบรรจุหรือไม่มีก็ได้ สามารถทำการแช่เยือกแข็งด้วยอากาศที่มีอุณหภูมิ –18 ถึง –34 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่านี้ โดยให้อากาศเย็นหมุนเวียนอย่างรุนแรงในห้องแช่เยือกแข็ง ความเร็วลมที่สูงนี้จะลดความหนาของฟิล์มรอบอาหารและช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน วิธีการแช่เยือกแข็งนี้ทำได้โดยนำอาหารใส่ในถาดหรือตั้งบนสายพานโปร่งเหมาะสมที่จะใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันได้

การแช่เยือกแข็งมีหลายปัจจัยที่มีความสำคัญต่อคุณภาพสุดท้ายของอาหารแช่เยือกแข็งได้แก่ ความสดของอาหาร อัตราการแช่เยือกแข็ง อุณหภูมิ ความคงที่ของอุณหภูมิ ระยะเวลาการเก็บรักษา และสภาวะการทำละลาย (Le Bail *et al.,* 1999)

2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพอาหารระหว่างแช่เยือกแข็ง

การเก็บรักษาในสภาวะแช่เยือกแข็งมีผลต่อสี กลิ่น รส หรือคุณค่าทางโภชนาการน้อยมาก แต่สิ่งเหล่านี้อาจเกิดการสูญเสียในขั้นตอนการเตรียมหรือในระหว่างการแช่เยือกแข็ง การเติบโตของผลึกน้ำแข็งมีผลให้เกิดความเสียหายของเซลล์ ผลึกน้ำแข็งจะเกิดที่ส่วนใดขึ้นอยู่กับอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็ง โดยปกติการแช่เยือกแข็งอย่างช้า ๆ จะทำลายโครงสร้างของโดมากกว่าการแช่เยือกแข็งอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความแตกต่างของการเกิดผลึกน้ำแข็ง (Inoue and Bushuk, 1991) การแช่เยือกแข็งอย่างช้าๆ จะทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่และจะเกิดที่บริเวณภายนอกเซลล์ (extracellular) น้ำภายในเซลล์จะถูกดึงมาเพิ่ม

ขนาดของผลึกที่ภายนอกเซลล์ (Hsu *et al*., 1979) เนื่องจากผลึกน้ำแข็งจะมีความดันไอน้ำต่ำกว่าบริเวณภายในเซลล์ น้ำจากเซลล์จึงเคลื่อนที่ไปยังผลึกที่เติบโตเป็นผลให้เซลล์หดตัวลดขนาดลงและได้รับความเสียหายต่อไปเนื่องจากความเข้มข้นของตัวถูกละลายสูงขึ้น การทำละลายน้ำแข็งในอาหาร เซลล์ของอาหารจะไม่กลับมามีรูปร่างและความแข็งแรงเหมือนเดิม อาหารจะนิ่มมากขึ้นและสารต่างๆ ภายในเซลล์จะไหลออกสู่นอกเซลล์ ส่วนการแช่เยือกแข็งอย่างรวดเร็ว ผลึกน้ำแข็งจะเกิดขึ้นทั้งภายในเซลล์และนอกเซลล์ได้พร้อมๆ กัน ผลึกจึงมีขนาดเล็กและกระจายทั่วไป (ดังภาพที่ 2) จึงเกิดความเสียหายทางกายภาพเล็กน้อย อย่างไรก็ตามอุณหภูมิการเก็บรักษาที่ไม่คงที่จะมีผลให้ผลึกน้ำแข็งหลอมละลายและรวมตัวกันกลายเป็นน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่ (Paine and Paine, 1992)



ภาพที่ 2 การเกิดผลึกน้ำแข็งโดยการแช่เยือกแข็งแบบช้า (a) และเร็ว (b) ในเซลล์เนื้อเยื่อพืช

The crystal of ice by fast and slow rate of freezing in plant cell.

Source: Saisanom Praditduang (2540)

2.2 การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบในอาหารแช่เยือกแข็ง

2.2.1 โปรตีน

การแช่เยือกแข็งมีผลให้โปรตีนสูญเสียสภาพและทำให้การละลายลดลง (Zayas, 1997) การสูญเสียสภาพของโปรตีนเนื่องจาก 3 ปัจจัย คือ การเปลี่ยนแปลงความชื้น ลิปิด และผลของเมตาบอไลท์จากเซลล์ (ดังตารางที่ 1) การสูญเสียความชื้นเนื่องจากผลิตภัณฑ์ไม่ได้ห่อหุ้มด้วยบรรจุภัณฑ์หรือบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ไม่มีคุณภาพมีผลให้เกิดลักษณะไหม้เกรียม (freeze-burn) และมีผลให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามโปรตีนที่ละลายได้และคุณค่าทางอาหารอื่นๆ ยังคงอยู่ (Paine and Paine, 1992) ในขณะที่การสลายตัวของไขมัน รวมทั้งมาลอนอัลดีไฮด์ (malonaldehyde) จะก่อให้เกิดพันธะเชื่อมระหว่างโพลิเปปไทด์ จึงทำให้โปรตีนมีความสามารถในการละลายลดลง (Xiong, 1997) Martin-Polo (1996 อ้างโดย จักรี ทองเรือง, 2544) น้ำตาลสามารถยับยั้งการสูญเสียสภาพโปรตีน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการยับยั้งการเกิดพันธะไดซัลไฟด์ระหว่างโมเลกุลโปรตีน Lee และ Timasheff (1981) กล่าวว่า ซูโครสเมื่ออยู่ในสภาพสารละลายจะเพิ่มแรงตึงผิวของน้ำ น้ำส่วนอื่นที่มีแรงตึงผิวต่ำจึงมีแนวโน้มที่จะล้อมรอบโมเลกุลโปรตีน

Berglund และคณะ (1991) ได้ศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของโดแช่เยือกแข็ง พบว่า หลังการเก็บรักษาโดในสภาวะแช่เยือกแข็งเป็นเวลา 24 สัปดาห์ โครงข่ายกลูเตนมีความต่อเนื่องน้อยและแยกออกจากเม็ดสตาร์ช เนื่องจากถูกผลึกน้ำแข็งทำลาย ขณะที่โดสดโครงข่ายของกลูเตนจะสามารถตรึงเม็ดสตาร์ชไว้

Ribotta และคณะ (2001) กล่าวว่า ขนมปังที่อบจากโดแช่เยือกแข็งมีคุณภาพลดลง เนื่องจากผลึกที่เกิดขึ้นจะทำลายโครงร่างตาข่ายของกลูเตนในโดตามระยะเวลาการเก็บรักษาและจำนวนครั้งในการแช่เยือกแข็งและทำละลายสลับกัน (Rouillé *et al.,* 2000; Nemeth *et al.*, 1996) โดยจะทำลายคุณสมบัติทางกายภาพ มีผลทำให้พันธะไฮโดรโฟบิก (hydrophobic bond) อ่อนแอและเกิดการแพร่กระจายของน้ำในโครงสร้างของกลูเตน (Varriano-Marston *et al.,* 1980; Räsänen *et al*., 1995) โดยปกติส่วนที่มีขั้วของหมู่อะมิโนในโครงสร้างของโปรตีนจะอยู่ภายนอก ส่วนของหมู่อะมิโนที่ไม่มีขั้วจะอยู่ภายใน โปรตีนจึงสามารถจับกับโมเลกุลของน้ำได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน แต่เมื่อนำโปรตีนมาแช่เยือกแข็งจะทำให้โครงสร้างของโปรตีนไม่คงตัวและหมู่ไฮโดรโฟบิกเคลื่อนที่สู่ภายนอก (Xiong, 1997)

ตารางที่ 1 สาเหตุของการแช่เยือกแข็งที่มีผลให้โปรตีนสูญเสียสภาพและวิธีการป้องกัน

Causes of freeze-induced protein denaturation and possible prevention methods.

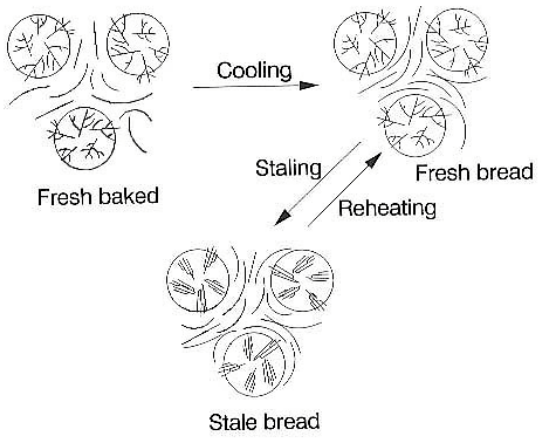
Causes	Mode of action	Method to minimize denaturation
Ice formation	Mechanical damage	Fast freezing rate
	Cell-wall disruption	Low thawing temperature
Recrystallization	Mechanical damage	Low temperature storage
		Prevent temperature fluctuation
Dehydration	Increased exposure of hydrophobic groups; unfold	Cryoprotectants
Salt concentration	Modified electrostatic interaction; unfolding	Cryoprotectants
Oxidation	Modified amino acid side chains	Antioxidants
	Peptide bond cleavage	
Lipids	Protein-lipid complexes	?
Metabolites	Formaldehyde-methylene bridge between polypeptide	Inactivate trimethylamine demethylase

Source: Xiong (1997)

2.2.2 สตาร์ช

การแช่เยือกแข็งมีผลต่ออาหารที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน ซึ่งสตาร์ชประกอบด้วยอะไมโลสและอะไมโลเพกตินมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการเก็บรักษา โดยอะไมโลสจะรวมตัวกันแน่นและก่อตัวเป็นผลึก ในขณะที่อะไมโลเพกตินจะมีความคงตัวสูงกว่า เพราะโครงสร้างมีลักษณะเป็นกิ่งก้าน ดังภาพที่ 3 จึงทำให้ก่อตัวเป็นผลึกอย่างช้าๆ โดยลักษณะที่ปรากฏนี้เรียกว่า รีโทรเกรเดชัน การเกิดรีโทรเกรเดชันจะเกิดหลังจากที่สตาร์ชผ่านการเกิดเจลแล้ว ทำให้เจลมีความหนาแน่น เกิดการก่อตัวของผลึก และทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะไม่สด (staling) (Mua and Jackson, 1998) การเกิดรีโทรเกรเดชันเนื่องจากหลังการให้ความร้อน โดยความชื้นจะเคลื่อนที่จากสตาร์ชไปสู่กลูเตน นอกจากนี้น้ำจะเคลื่อนที่จากภายในผลิตภัณฑ์ไปสู่ผิวนอก เมื่อรับประทานจะรู้สึกว่าเนื้อสัมผัสหยาบและแห้งในปาก โดยผลึกของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินจะสลายที่อุณหภูมิ 130 และ 55 องศาเซลเซียส

ตามลำดับ (Zhang and Jackson, 1992) แต่การเพิ่มความชื้นในผลิตภัณฑ์สามารถชะลอการเกิดลักษณะไม่สดได้ (He and Hoseney, 1990) เพราะความชื้นจะช่วยลดพันธะข้ามระหว่างสตาร์ชบางส่วนที่ละลายได้กับโปรตีน (Martin *et al*., 1989) อย่างไรก็ตามปัจจัยที่ควรนำมาพิจารณาต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน คือ อุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิลดลงจะมีผลให้การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชเพิ่มขึ้น และความแตกต่างของการเกิดขึ้นกับอัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน โดยในระหว่างการเก็บรักษาอาหารจะพบว่าอะไมโลสเกิดเร็วกว่าอะไมโลเพกติน (Zhang and Jackson, 1992; Cauvain, 1998; Belitz and Grosch, 1999)



ภาพที่ 3 การเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของโครงสร้างสตาร์ชในขนมปังหลังอบและขณะเก็บรักษาขนมปัง

The molegular change of starch structure in bread passed oven and storage.

Source: Stauffer (1993)

2.2.3 ไขมัน

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของไขมันที่สำคัญ คือ การหืน การแช่เยือกแข็งจะช่วยป้องกันการเกิดการหืนในอาหารที่มีไขมันได้ดี (วิลาวัณย์ เจริญจิระตระกูล, 2537) การแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า –10 องศาเซลเซียส สามารถลดการออกซิเดชันของไขมันแบบใช้เอนไซม์และไม่ใช้เอนไซม์ได้ (Rousseau and Marangoni, 1998) การหืนเป็นการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาทางเคมีของไขมันหรือน้ำมัน ทำให้มีกลิ่นผิดปกติและสมบัติทางเคมีและกายภาพเปลี่ยนไป การหืนเกิดขึ้นได้ 3 แบบ (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2545) คือ

2.2.3.1 ลิโพไลซิส (Lipolysis) เป็นปฏิกิริยาแบบไฮโดรไลซิสที่พันธะเอสเทอร์ในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์หรือลิปิดด้วยเอนไซม์ไลเพส ความร้อน กรด ด่าง และความชื้น หรือปฏิกิริยาเคมีใดๆ ก็ตาม การเกิดลิโพไลซิสเป็นปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นขณะทอดอาหารที่มีน้ำหรือมีความชื้นสูง และใช้อุณหภูมิสูง กรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นไวต่อการเกิดออกซิเดชัน

2.2.3.2 การหืนเนื่องจากออกซิเดชัน (oxidation rancidity) เป็นการหืนที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาออโตออกซิเดชัน (autoxidation) ที่พันธะคู่ของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวกับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็น peroxide linkage ขึ้นระหว่างพันธะคู่ ออโตออกซิเดชันจะเกิดขึ้นเองอย่างต่อเนื่องเมื่อมีไขมันและน้ำมันมาสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ ทำให้มีกลิ่นและรสชาติผิดปกติ ไขมันและน้ำมันที่มีโลหะผสมอยู่ เช่น ทองแดงและตะกั่ว จะเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ความร้อนและแสงก็มีผลช่วยเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วย การหืนที่เกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้ยังอาจเกิดขึ้นได้เมื่อมีเอนไซม์ลิพอกซิเดส (lipoxidase) ช่วยเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็น enzymatic oxidation

ในสภาวะแช่เยือกแข็งความเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชันจะลดลงมากกว่าปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นจากการเร่งของตัวถูกทำละลายที่เพิ่มความเข้มข้น (Erickson, 1997) นอกจากนี้ Bhattacharya และคณะ (1988) พบว่า ขนมพายไส้วัวซึ่งไม่ผ่านความร้อนแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ –12.2 องศาเซลเซียส มีค่าไทโอบาร์บิทูริกแอซิด (thiobarbituric acid, TBA) สูงกว่าตัวอย่างที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ –23.3 หรือ –34.4 องศาเซลเซียส

2.2.3.3 คีโตนิก แรนซิดิตี้ (Ketonic rancidity) เป็นการเกิดปฏิกิริยา enzymatic oxidation ที่มีโมเลกุลของกรดไขมันอิ่มตัวได้เป็นสารประกอบพวกคีโตน

2.2.4 จุลินทรีย์

การแช่เยือกแข็งมีผลให้เซลล์จุลินทรีย์ตายเป็นจำนวนมาก เนื่องจากการแช่เยือกแข็งมีผลให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น จึงทำให้ความเป็นกรด-เบสในเซลล์ต่ำลง เกิดดีไฮเดรชัน (dehydration) เกิดความเป็นพิษเนื่องจากไอออนิก เนื้อเยื่อถูกทำลาย cytoskeletal อ่อนแอ และเอนไซม์ไกลโคไลติกมีกิจกรรมต่ำลง (Giannou *et al*., 2003) นอกจากนี้จุลินทรีย์ยังถูกทำลายโดยผลึกน้ำแข็ง ในขณะเดียวกันอาจมีเซลล์จุลินทรีย์บางชนิดที่สามารถรอดชีวิตหลังการแช่เยือกแข็ง ซึ่งเซลล์จุลินทรีย์อาจเกิดความเสียหายบางส่วนหรืออาจไม่ได้รับความเสียหายก็ได้ ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่อไปนี้ คือ

2.2.4.1 ชนิดของจุลินทรีย์ จุลินทรีย์แต่ละชนิดมีความต้านทานต่อการแช่เยือกแข็งต่างกัน แบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

ก. กลุ่มไวต่อการแช่เยือกแข็ง ได้แก่ ยีสต์ รา และแบคทีเรียส่วนใหญ่ที่เป็นแกรมลบ

ข. กลุ่มทนปานกลาง ได้แก่ พวกสแตฟิโลค๊อกไค (Staphylococci) และเอนเทอโรค๊อกไค (Enterococci) และแบคทีเรียแกรมบวก

ค. กลุ่มที่ไม่ไวต่อการแช่เยือกแข็ง ได้แก่ พวกที่สร้างสปอร์ โดยเฉพาะสปอร์ของบาซิลัส (Bacillus) และคลอสตริเดียม (Clostridium)

2.2.4.2 อัตราการแช่เยือกแข็ง ถ้าอัตราการแช่เยือกแข็งเร็วมากขึ้น จะทำให้ผ่านช่วงอุณหภูมิที่มีผลในการทำลายเซลล์จุลินทรีย์ได้เร็วเท่านั้น จึงทำให้เซลล์จุลินทรีย์เสียหายน้อย

Morice และคณะ (1992) ศึกษาอิทธิพลของอัตราการแช่เยือกแข็งต่อการรอดชีวิตของสเตรปโตค๊อกคัส เทอร์โมฟิลัส (*Streptococcus thermophilus*) โดยใช้อัตราเร็ว 4 ระดับ คือ 2 7 12 และ 150 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่า การแช่เยือกแข็งโดยใช้อัตราเร็ว 150 องศาเซลเซียสต่อนาที มีจำนวนรอดชีวิตมากที่สุด

2.2.4.3 อุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิในการแช่เยือกแข็งต่ำมากจะทำให้เซลล์จุลินทรีย์ตายและบาดเจ็บมากขึ้น

Hsu และคณะ (1979) นำโดที่ผสมยีสต์ไปแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ –10 –20 –40 และ –78 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิต่ำมากมีผลให้ระยะเวลาหมักเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะที่ –78 องศาเซลเซียส ไม่เกิดการหมักภายใน 6 ชั่วโมง

2.2.4.4 ระยะเวลาเก็บรักษา การเก็บรักษาอาหารแช่เยือกแข็งเป็นระยะเวลานานๆ จุลินทรีย์จะค่อยๆ ลดจำนวนลง

Wolt และ D'Appolonia (1984) ศึกษาผลของระยะเวลาในการแช่เยือกแข็งต่อการรอดชีวิตของยีสต์ พบว่า เมื่อระยะเวลาในการแช่เยือกแข็งนานขึ้นมีผลให้ยีสต์มีจำนวนลดลง

2.2.4.5 ประเภทของอาหาร เช่น อาหารที่มีส่วนผสมของ น้ำตาล เกลือ โปรตีน และไขมัน อาจช่วยป้องกันจุลินทรีย์จากอุณหภูมิขณะแช่เยือกแข็ง

2.2.4.6 อัตราการทำละลาย ถ้าเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จะทำให้แบคทีเรียบางชนิดบาดเจ็บ

แม้ว่ากิจกรรมของจุลินทรีย์ถูกยับยั้งในอุณหภูมิแช่เยือกแข็ง แต่ไม่สามารถเก็บรักษาอาหารไว้ได้นานตลอดไป ระยะเวลาการเก็บรักษาอาหารแช่เยือกแข็งที่นานที่สุดไม่ได้ขึ้นกับจำนวนจุลินทรีย์เท่านั้น แต่ต้องคำนึงถึงลักษณะอื่นๆ ของอาหาร เช่น กลิ่นรส ลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารด้วย ดังนั้นอาหารแช่เยือกแข็งมีอายุการเก็บรักษาแตกต่างกันขึ้นกับอุณหภูมิที่เก็บรักษาและประเภทของอาหาร

2.3 การตกผลึกใหม่ของน้ำแข็ง (recrystallization)

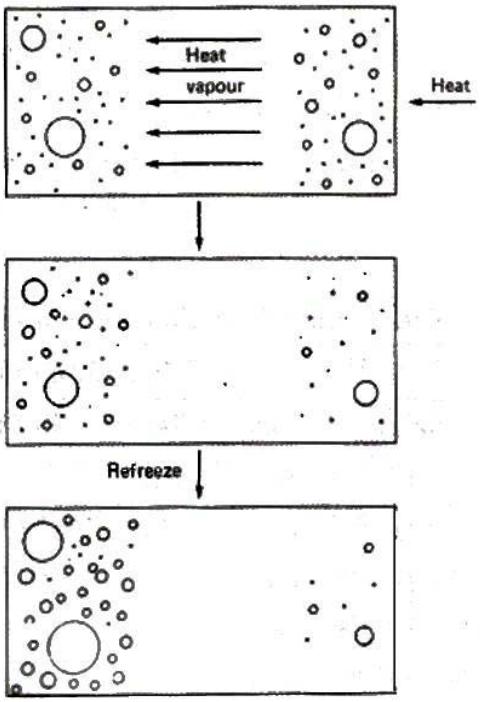
การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของผลึกน้ำแข็ง เช่น จำนวน ขนาด รูปร่าง หรือการเรียงตัวของผลึกน้ำแข็ง เรียกว่า การตกผลึกใหม่ (recrystallisation) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการสูญเสียคุณภาพของอาหารบางชนิดการตกผลึกใหม่ในอาหารแบ่งเป็น 3 ประเภท (วิไล รังสาดทอง, 2545; ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาสิก, 2532) ดังนี้

2.3.1 การตกผลึกใหม่แบบไอโซแมส (isomass) เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผิวหน้าหรือโครงสร้างภายใน มักทำให้อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรลดลง

2.3.2 การตกผลึกใหม่แบบอะเครทีฟ (accretive) ผลึกน้ำแข็งที่อยู่ใกล้กันหรือสัมผัสกันจะรวมตัวกัน ทำให้เกิดผลึกที่ใหญ่ขึ้น มีผลให้จำนวนผลึกทั้งหมดในอาหารลดลง

2.3.3 การตกผลึกใหม่แบบไมเกรทอรี่ (migratory) เป็นการเพิ่มขนาดเฉลี่ยของผลึกจากการใช้ผลึกที่มีขนาดเล็กกว่า ส่งผลให้จำนวนของผลึกลดลง ดังภาพที่ 4

การตกผลึกใหม่แบบไมเกรทอรี่เป็นการตกผลึกใหม่ที่สำคัญที่สุดในอาหาร มีสาเหตุส่วนใหญ่จากอุณหภูมิการเก็บรักษาที่ไม่สม่ำเสมอ ถ้ามีความร้อนเข้าไปในเครื่องทำความเย็น ผิวหน้าของอาหารจะอุ่นขึ้นเล็กน้อย ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ผลึกน้ำแข็งละลายเป็นบางส่วน ผลึกที่ใหญ่กว่าจะเล็กลงและผลึกที่มีขนาดเล็ก (เล็กกว่า 2 ไมโครเมตร) จะหายไป ผลึกน้ำแข็งที่ละลายอยู่นี้จะทำให้ความดันไอน้ำเพิ่มขึ้น ความชื้นจึงเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีความดันต่ำกว่าเป็นผลให้อาหารที่อยู่ใกล้แหล่งความร้อนนั้นแห้ง เพราะเกิดการสูญเสียน้ำ เมื่ออุณหภูมิลดลงอีกไอน้ำจะไม่สร้างนิวเคลียสใหม่ แต่จะรวมตัวกับผลึกที่มีอยู่แล้วมีผลให้ผลึกนั้นมีขนาดใหญ่ขึ้น คุณภาพของผลิตภัณฑ์จึงลดลงเหมือนการแช่เยือกแข็งอย่างช้าๆ



ภาพที่ 4 การตกผลึกใหม่แบบไมเกรทอรี่

Migratory recrystallization.

Source: Wilai Rangsattong (2543)

2.4 การทำละลายน้ำแข็ง

การทำละลายของผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็ง หมายถึง กระบวนการให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็ง เพื่อทำให้ผลึกน้ำแข็งละลายกลับคืนสู่สภาพเดิม ซึ่งเป็นขั้นสุดท้ายของการแช่เยือกแข็งก่อนที่จะนำไปบริโภคหรือแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นต่อไป การทำละลายที่อุณหภูมิห้องจะใช้เวลานานมากโดยเฉพาะอาหารที่มีขนาดใหญ่ ชิ้นหนา ทำให้เสียเวลาและเปลืองพื้นที่ในการทำละลาย โดยเฉพาะในระดับอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังมีผลกระทบต่อคุณภาพของวัตถุดิบที่นำมาทำละลายด้วย เพราะการใช้เวลานานมีผลให้จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ที่ส่วนผิวนอกของอาหาร ซึ่งเป็นผลให้มีจำนวนจุลินทรีย์เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะมีผลกระทบต่อการแปรรูปในขั้นต่อไปและยังทำให้คุณภาพด้านกลิ่น รส เนื้อสัมผัส และสีเปลี่ยนไปได้ด้วย

2.5 วิธีการทำละลาย

ปัจจุบันในระดับครัวเรือนนิยมใช้ตู้ไมโครเวฟสำหรับคืนสภาพของอาหารแช่เยือกแข็ง เนื่องจากตู้ไมโครเวฟนั้นปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้แพร่เข้าสู่อาหาร โมเลกุลของน้ำแข็งทั้งภายในและที่ผิวหน้าอาหารจะได้รับการกระตุ้นให้สั่นไหวเกิดความร้อนขึ้นพร้อมกัน ส่งผลให้อาหารมีน้ำไหลเยิ้มน้อย ดังนั้นการทำละลายด้วยตู้ไมโครเวฟจึงเป็นวิธีที่รวดเร็ว ใช้พื้นที่น้อย และสามารถทำให้น้ำแข็งละลายได้อย่างสมบูรณ์

ปัจจุบันการทำละลายอาหารที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง เช่น อาหารสำเร็จรูป ซึ่งมีมากมายหลายชนิดทั้งอาหารคาวและหวาน ส่วนใหญ่จะระบุให้คืนสภาพด้วยไมโครเวฟ ส่วนอาหารกึ่งสำเร็จรูปแช่เยือกแข็ง เช่น กุ้งชุบแป้งแช่เยือกแข็ง สามารถนำไปทอด โดยไม่ต้องทำละลายน้ำแข็งก่อน

ไพศาล วุฒิจำนงค์ และสุรางค์ กสิสุวรรณ (2537) ศึกษาวิธีการทำละลายขนมพายชั้นแช่เยือกแข็ง 3 วิธี คือ ทำละลายที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ทำละลายที่อุณหภูมิห้องและทำละลายด้วยตู้ไมโครเวฟ พบว่า ทั้ง 3 วิธีไม่มีผลต่อการทดสอบทางประสาทสัมผัสทางด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และคุณลักษณะรวม อย่างมีนัยสำคัญ

3. ผลของพลังงานไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลงของอาหารแช่เยือกแข็ง

3.1 การเกิดปฏิกิริยาเคมี

การดูดซับพลังงานควันตัมมีผลให้ระดับโมเลกุลเปลี่ยนแปลง พลังงานควันตัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ แสดงในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่ารังสีแกมมาและรังสีเอกซ์สามารถสลายพันธะเคมีได้ทุกชนิดในสารอินทรีย์ แสดงดังตารางที่ 3 ขณะที่คลื่นไมโครเวฟมีพลังงานควันตัมเพียง 0.000012 อิเล็กตรอนโวลต์ ในการสลายพันธะเคมี ซึ่งจะเห็นได้ว่าพลังงานควันตัมของไมโครเวฟมีค่าต่ำกว่าพลังงานพันธะอื่นๆ มาก ดังนั้น พลังงานควันตัมของไมโครเวฟมีค่าต่ำเกินกว่าที่จะสลายพันธะเคมีและส่งเสริมการเกิดอนุมูลอิสระที่จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อไป ถ้าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ เนื่องจากพลังงานควันตัม พลังงานส่วนนั้นน่าจะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน (Rosén, 1972)

ตารางที่ 2 พลังงานควันตัมของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า

Quantum energies of differently named electromagnetic radiations

Radiation type	Wavelength (cm)	Quantum energy (eV)
Gamma rays	10^{-10}	1,240,000
X-rays	10^{-9}	124,000
Ultraviolet light	0.00003	4.1
Violet light	0.00005	2.5
Infrared light	0.01	0.012
Microwave	10	0.000012
Radio	30,000	0.000000004

Source: Rosén (1972)

ตารางที่ 3 พลังงานของพันธะเคมีเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานควันตัม

Energies of chemical bonds given for comparison with quantum energies

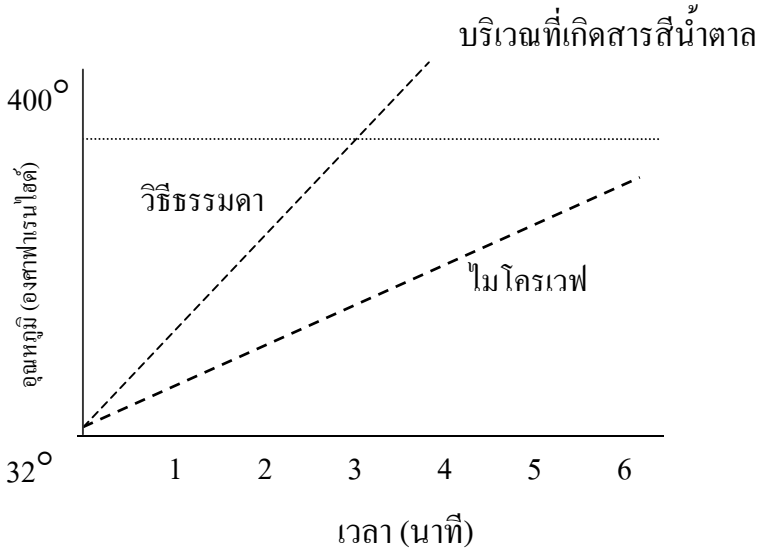
Bond	Energy (eV)
H – OH	5.2
$H - CH_3$	4.5
$H - NHCH_3$	4.0
$H_3C - CH_3$	3.8
$Ph\ CH_2 - COOH$	2.4

Source: Rosén (1972)

3.2 ลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์

การอบด้วยตู้ไมโครเวฟมีผลให้ผลิตภัณฑ์ไม่เกิดสีน้ำตาล (Dziezak, 1989) เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟ ทำให้อุณหภูมิของชิ้นอาหารไม่สูงพอที่จะเกิดสีน้ำตาล จากภาพที่ 5 จะเห็นได้ว่าผิวของอาหารที่ได้รับความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟมีอุณหภูมิไม่สูงพอที่จะเกิดสารสีน้ำตาล (Moore, 1979 อ้างโดย กมลทิพย์ มั่นภักดี, 2542) ซึ่งสารสีน้ำตาลนี้ยังมีผลต่อรสชาติของผลิตภัณฑ์ การไม่เกิดสีน้ำตาลส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ขาดรสชาติ (Dziezak, 1989)

และการใช้ไมโครเวฟในการให้ความร้อนแก่อาหารแช่เยือกแข็ง มีผลทำให้อาหารที่ผ่านความร้อนแล้วแช่เยือกแข็งมีลักษณะชื้น เนื่องจากความชื้นออกมาจากภายในและการใช้ไมโครเวฟจะใช้ระยะเวลาในการทำให้เกิดความร้อนสั้น จึงมีเวลาไม่เพียงพอที่จะให้น้ำระเหยออกไปจนถึงระดับที่จะทำให้อาหารกรอบได้ (Carroll, 1989) ถ้าเป็นการอบหรือทอดผิวด้านนอกจะได้รับอุณหภูมิสูง ทำให้ความชื้นระเหยออกไปได้



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาและวิธีการปรุงต่อการเกิดสารสีน้ำตาลที่ผิวของอาหาร

The relative between time and cooking method on browning of food surface.

Source: Moore (1979 อ้างโดย Kamonthip Manphakdee, 2542)

3.3 การสูญเสียเนื่องจากการทำละลายอาหารแช่เยือกแข็ง (drip loss)

การใช้พลังงานไมโครเวฟในการทำละลายสามารถลดของเหลวที่ได้ลงถึงร้อยละ 5-10 (Giese, 1992) เนื่องจากการใช้พลังงานไมโครเวฟจะทำให้เวลาที่ใช้ในการทำละลายสั้นลง ทำให้ผลึกน้ำแข็งที่มีอยู่เดิมเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อย การเกิดของเหลวที่ได้จากการทำละลายจึงลดลง โดย Ziauddin (1993) ศึกษาผลของวิธีการทำละลายที่แตกต่างกันต่อค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการทำละลาย ซึ่งได้แก่ การทำละลายที่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิแช่เย็นให้น้ำไหลผ่าน และทำละลายด้วยตู้ไมโครเวฟ ของเนื้อควายชิ้นแช่เยือกแข็งด้วยกระแส

ลมเย็น พบว่า การทำละลายด้วยตู้ไมโครเวฟทำให้ค่าการสูญเสียเนื่องจากการทำละลายต่ำที่สุด และมีค่าแตกต่างจากวิธีอื่นอย่างมีนัยสำคัญ

3.4 การทำละลายต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

การทำละลายให้สมบูรณ์ที่อุณหภูมิห้องต้องใช้ระยะเวลา 2-5 วัน ซึ่งส่งผลให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตและเกิดการเน่าเสียบริเวณผิวของอาหาร ขณะที่ทำละลายที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส จะใช้ระยะเวลานานมาก ส่วนการทำละลายด้วยพลังงานไมโครเวฟจะใช้ระยะเวลาสั้นมาก การให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ทั่วไปและจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเสียบริเวณใกล้ผิว แต่อย่างไรก็ตามยังขึ้นกับระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ (Mermelstein, 1989) พลังงานไมโครเวฟไม่มีผลต่อจุลินทรีย์ในแง่ของการทำลาย (Carroll, 1989)

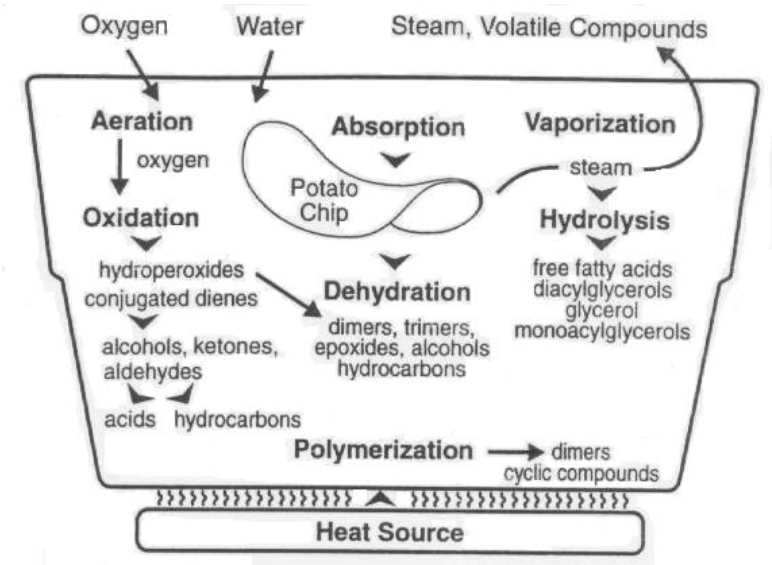
4. การทอด (Frying)

การทอดเป็นกรรมวิธีที่มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเปลี่ยนแปลงคุณภาพการบริโภคของอาหาร วัตถุประสงค์รอง คือ การถนอมรักษาอาหาร โดยการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ เอนไซม์ และลดค่าวอเตอร์แอกทีวิตีของอาหาร การทอดอาหารมี 2 วิธี คือ วิธีทอดแบบน้ำมันตื้น (shallow frying) และทอดแบบน้ำมันท่วม (deep-fat frying) การทอดแบบน้ำมันท่วมเป็นวิธีที่นิยมใช้สำหรับเตรียมอาหาร ลักษณะของอาหารทอด คือ มีกลิ่นรส ผิวของอาหารมีสีน้ำตาลทอง และลักษณะเนื้อสัมผัสกรอบ ไขมันหรือน้ำมันที่ใช้ในการทอดควรมีจุดเกิดควัน (smoke point) ที่อุณหภูมิสูงและมีความคงตัวต่อการเกิดไฮโดรไลซิสและออกซิเดชันที่อุณหภูมิของการทอดและควรมีกลิ่นติดผลิตภัณฑ์ทอดเพียงเล็กน้อย โดยปกติการทอดอาหารจะใช้อุณหภูมิระหว่าง 160-180 องศาเซลเซียส (Saguy and Dada, 2003)

4.1 การเปลี่ยนแปลงของอาหารระหว่างการทอด

เมื่อทอดอาหารในน้ำมันร้อน อาหารที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบจะเกิดเจลาติไนเซชันอย่างรวดเร็วและเกิดฟองอากาศรอบๆ อาหาร เนื่องจากความชื้นจากอาหารขยายตัวไปเป็นไอน้ำแล้วระเหยออกไปตามช่องว่างของอาหารซึ่งมีลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งประกอบด้วยท่อแคปปิลารี่ขนาดต่างๆ ทำให้ผิวของอาหารเริ่มแห้ง (ดังภาพที่ 6) รูพรุนของอาหารเกิดขึ้นเนื่องจากโปรตีนตกตะกอนและเมื่ออาหารสูญเสียความชื้นที่ผิวเป็นจำนวนมาก

จะทำให้อาหารเกิดเปลือกและกลิ่นรส นอกจากนี้ช่องว่างที่สูญเสียความชื้นจะเกิดสภาพสุญญากาศ ทำให้น้ำมันถูกดูดซับเข้าสู่อาหาร และเมื่อนำอาหารขึ้นจากน้ำมัน อุณหภูมิที่ลดลงทำให้เกิดการควบแน่นของน้ำมัน ดังนั้นจึงเร่งให้เกิดการดูดซับน้ำมันเพิ่ม การพัฒนาสี กลิ่นและรส การใช้อุณหภูมิสูงและอาหารที่มีความชื้นต่ำทำให้น้ำตาลกลายเป็นคาราเมล กรดไขมันเกิดออกซิเดชันและเปลี่ยนไปเป็นไฮโดรคาร์บอน อัลดีไฮด์ ฟูแรน คีโตน แอลกอฮอล์และสารประกอบของกรดได้ (Min, 1998) ส่วนปฏิกิริยาเมลลาร์ดและปฏิกิริยาสทรีเกอร์ดีเกรเดชัน (streaker degradation) ทำให้เกิดกลิ่นต่างๆ เนื่องจากการรวมตัวกันของโปรตีนเปปไทด์ กรดอะมิโนหรือเอมีนกับน้ำตาลรีดิวซ์ที่อยู่ในอาหาร แต่ปฏิกิริยาสทรีเกอร์ดีกราเดชันจะเกิดในสภาวะที่มีกรดอะมิโนอิสระสูงและสภาวะการเกิดปฏิกิริยาที่รุนแรง เช่น อุณหภูมิหรือความดันสูง (Belitz, 1999)



ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและปฏิกิริยาเคมีระหว่างการทอด

The changing of physical and chemical reaction during frying.

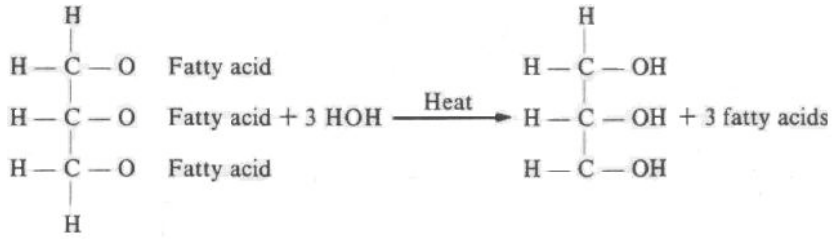
Source: Warner (1998)

4.2 การเปลี่ยนแปลงของน้ำมันระหว่างการทอด (Crosby and Kincs,1990)

ขณะทอดอาหาร น้ำมันจะเกิดปฏิกิริยาที่สำคัญซึ่งมีผลต่อการสลายตัวของน้ำมัน ได้แก่

4.2.1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

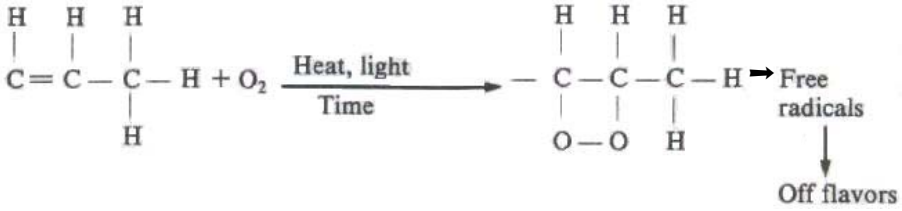
น้ำมันเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเนื่องจากความร้อนและน้ำ ส่งผลให้กรดไขมันแยกออกจากโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งประกอบด้วยกลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระ ถ้ากรดไขมันถูกไฮโดรไลซ์ 1 หรือ 2 ตำแหน่ง จากไตรกลีเซอไรด์จะเกิดไดกลีเซอไรด์ หรือโมโนกลีเซอไรด์ ตามลำดับ Saguy and Dada (2003) ได้ศึกษาผลของการฉีดน้ำ (0.1 มิลลิลิตรต่อนาที) ลงในน้ำมันข้าวโพดที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากรด พบว่าน้ำมันที่ฉีดน้ำลงไปมีค่ากรดเพิ่มขึ้น 0.55 มิลลิลิตรต่อกรัม ส่วนน้ำมันที่ไม่ฉีดน้ำมีค่ากรดเพิ่มขึ้น 0.05 มิลลิลิตรต่อกรัม ซึ่งกรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นจะลดจุดควันลง นอกจากนี้กลิ่นรสผิดปกติสามารถพัฒนาขึ้นได้ซึ่งขึ้นกับชนิดของกรดไขมัน ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและเกิดโฟม



Triglyceride Glycerol

4.2.2 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน

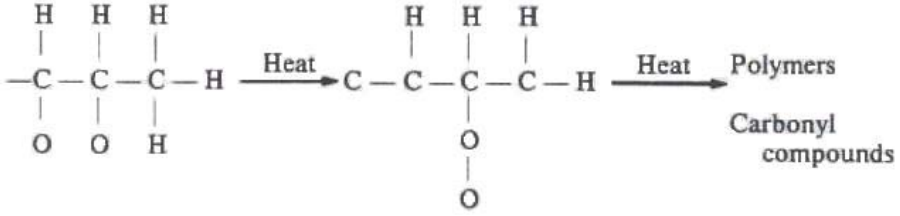
ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นเนื่องจากออกซิเจนทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่ของน้ำมันไม่อิ่มตัวได้สารเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะสลายตัวต่อไปเป็นอนุมูลอิสระ และพัฒนาต่อเป็นกลิ่นรสผิดปกติ ปัจจัยที่ส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น ออกซิเจน ความร้อน แสง และโลหะหนัก Shyu และคณะ (1998) ศึกษาการทอดแครอทแผ่นในสภาวะสุญญากาศโดยใช้น้ำมัน 3 ชนิด คือ น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันหมู ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที แล้วใช้น้ำมันเดิมทอดแครอทแผ่นซ้ำทุก 1 ชั่วโมง จนกระทั่งครบ 48 ชั่วโมง พบว่า ค่าเปอร์ออกไซด์ ซึ่งสามารถใช้เป็นดัชนีบ่งบอกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิปิดเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการทอดเพิ่มขึ้น ซึ่งน้ำมันปาล์มและน้ำมันหมูมีความคงตัวต่อความร้อนมากกว่าน้ำมันถั่วเหลือง โดยอัตราส่วนของลิโนเลอิคต่อปาล์มิติค ($C_{18:2}/C_{16:0}$) ของน้ำมันถั่วเหลืองลดลงมากกว่าน้ำมันอีกสองชนิด



Fatty acid Oxygen Peroxide

4.2.3 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน

การออกซิเดชันของน้ำมันชักนำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของกลุ่มกรดไขมัน ส่งผลให้น้ำมันมีสีดำ มีความหนืดเพิ่มขึ้น มีลักษณะเป็นโฟม และเพิ่มการดูดซับของอาหาร



Peroxide Hydroperoxide Breakdown compounds

5. อิทธิพลของน้ำที่มีผลต่อความกรอบของอาหาร

ความกรอบเกี่ยวข้องกับการรับรู้ทางประสาทสัมผัส 2 ส่วน คือ การรับรู้ด้วยปาก และหู ในขณะที่กัดอาหารและเสียงภายในศีรษะ เพราะเกิดการบดและแตกหักของเซลล์ขนาดเล็กจำนวนมากภายในอาหาร ความกรอบอาจจะเกิดขึ้นในอาหารที่มีความชื้นต่ำ เช่น แครกเกอร์ หรืออาหารที่มีความชื้นสูง เช่น ผักขึ้นฉ่าย ในกรณีความกรอบที่เกิดขึ้นในอาหารที่มีความชื้นต่ำ วอเตอร์แอกทิวิตี (a_w) ต่ำ และโครงสร้างเป็นรูพรุนเปิด โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์อาหารที่มีโครงสร้างแข็งจะให้ความกรอบที่มากกว่า เมื่อความชื้นในอาหารเพิ่มขึ้น โครงสร้างบางส่วนที่สามารถละลายน้ำได้เริ่มเกิดการละลาย ทำให้ใช้แรงในการบดอาหารน้อยลง และทำให้ขนาดของเสียงที่เกิดขึ้นลดลงด้วย จนกระทั่งถึงจุดจุดหนึ่งซึ่งใช้แรงในการบดน้อยและเสียงที่เกิดขึ้นลดลงมาก แสดงว่า อาหารนั้นมีลักษณะแฉะ ผลิตภัณฑ์ที่พิจารณาถึงความกรอบควรมีความชื้นร้อยละ 5 หรือต่ำกว่า และถ้าความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 3 จะดีที่สุด (Schiffmann, 1996)

โดยปกติลักษณะเปลือกของผลิตภัณฑ์อาหารชุบแป้งทอดจะมีวอเตอร์แอกทิวิตีและความชื้นต่ำ เนื่องจากในกระบวนการทอดทำให้น้ำระเหยออกไป แต่ภายในชิ้นอาหารจะมีวอเตอร์แอกทิวิตีและความชื้นสูง จึงเกิดปัญหาขึ้นในช่วงการเก็บรักษาทั้งที่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิแช่เย็นและแช่เยือกแข็ง เนื่องจากมีแรงผลักดันที่จะทำให้เกิดสมดุลระหว่างผิวชั้นนอก คือแป้งชุบทอดและภายในซึ่งก็คือชิ้นอาหารมีวอเตอร์แอกทิวิตีแตกต่างกัน โดยจะทำให้เปลือกมีวอเตอร์แอกทิวิตีสูงขึ้น มีผลทำให้นิ่ม แฉะ และไม่กรอบ ดังนั้นก่อนบริโภคจึงต้องให้ความร้อนอีกครั้ง เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์กรอบขึ้น เช่น การทอดแบบน้ำมันท่วม หรืออบในเตาอบ ซึ่งจะช่วยให้น้ำที่ผิวหน้าระเหยและกลับมากรอบอีกครั้ง โดยภายในชิ้นอาหารไม่มีการสูญเสียความชื้นสู่ผิวหน้า (Schiffmann, 1996)

นอกจากนี้อาหารทอดชนิดอื่น เช่น เฟรนซ์ฟราย ภายหลังการทอดจะค่อยสูญเสียความกรอบ เนื่องจากความชื้นภายในแท่งเฟรนซ์ฟรายจะซึมผ่านออกสู่ภายนอกตลอดเวลา (เนตรนภิส วัฒนสุชาติ, 2544)

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของการให้ความร้อนก่อนแช่เยือกแข็งและทำละลายต่อคุณภาพกะหรี่ปั๊ปแช่เยือกแข็ง
2. เพื่อศึกษาผลของจำนวนรอบของการแช่เยือกแข็งและทำละลายซ้ำต่อคุณภาพของกะหรี่ปั๊ป
3. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊ประหว่างเก็บรักษาในสภาวะแช่เยือกแข็ง
4. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของกะหรี่ปั๊ปทอดแช่เยือกแข็งระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส
5. เพื่อสำรวจและทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊ปแช่เยือกแข็ง
6. เพื่อประเมินต้นทุนวัตถุดิบและการแช่เยือกแข็งของกะหรี่ปั๊ปไส้ไก่แช่เยือกแข็ง