บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

กุ้งเป็นสัตว์น้ำที่เสื่อมคุณภาพได้ง่ายหลังจากนำขึ้นมาจากน้ำ ดังนั้นเพื่อถนอมรักษาคุณภาพของกุ้งไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่ไม่ต้องการ วิธีหนึ่งซึ่งนิยมใช้คือ การนำกุ้งไปแช่เยือกแข็ง โดยปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของกุ้งต้มสุกแช่เยือกแข็งมีดังนี้

2.1 วัตถุดิบ

กุ้งเป็นสัตว์น้ำที่ไม่มีกระดูกสันหลัง ลำตัวยาว มีเปลือกหุ้มลำตัว และแบ่งเป็นปล้อง ๆ จัดอยู่ใน Phylum Arthopoda Class Crustacea กุ้งกุลาดำหรือกุ้งทะเล หรือกุ้งม้าลาย มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า Penaeus monodon Febricius และมีชื่อภาษาอังกฤษว่า Tiger prawn หรือ Giant tiger prawn (วัลลภ คงเพิ่มพูล, 2532) การเปลี่ยนแปลงของตัวกุ้งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

2.1.1 เมื่อกุ้งมีชีวิตอยู่ในน้ำทะเล ความเข้มข้นของสาร body fluid ที่อยู่ภายในตัวจะใกล้เคียงกับความเข้มข้นของน้ำทะเล body fluid เหล่านี้ประกอบด้วย น้ำตาล น้ำตาลฟอสเฟต โปรตีนที่ละลายได้ และกรดอะมิโนอิสระ กุ้งจะมีแหล่งสะสมกรดอะมิโนภายในเซล และมีปริมาณแตกต่างกันไปตามแหล่งน้ำที่มีความเค็มต่างกัน (Pedraja, 1970)

ปริมาณกรดอะมิโนอิสระ และโปรตีนที่ละลายได้ภายในเซลล์จะเป็นตัวที่คอยควบคุมกระบวนการ Osmosis (Osmoregulation) ดังสมการข้างล่างนี้

Free amino acid + Other Soluble substances (body fluids) $\longleftrightarrow$ Ionic strength of sea water (Environment)

ดังนั้นเมื่อกุ้งถูกจับขึ้นมาจากน้ำทะเล แหล่งของกรดอะมิโนอิสระภายในตัวกุ้งจะถูกกระทบกระเทือนโดยกระบวนการ Osmoregulation ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการกระทำของน้ำย่อยและเชื้อจุลินทรีย์ จึงขึ้นอยู่กับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อองค์ประกอบภายในตัวกุ้ง ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดขึ้นแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของกุ้ง และแหล่งที่จับกุ้งมา

กรดอะมิโนที่มีความสำคัญต่อคุณภาพของกุ้ง (Pedraja, 1970) ได้แก่

- Cystine และ Methionine โครงสร้างของกรดอะมิโนชนิดนี้ประกอบด้วย -S group เมื่อผ่านการย่อยสลายจึงเกิดเป็นสารประกอบที่มีหมู่ -S อยู่ด้วย ได้แก่ hydrogen sulfide ,mercaptan เป็นต้น ซึ่งเป็นสารสำคัญต่อกลิ่นของกุ้ง

- Leucine เมื่อผ่านการย่อยสลาย จะกลายเป็น acetic acid ทำให้เกิดรสเปรี้ยว

- Alanine ย่อยแล้วได้ propionic acid หรือ Alanine อาจเปลี่ยนเป็น hydroxy propionic acid (lactic acid) และเปลี่ยนเป็น carbondioxide , ammonia , acetaldehyde และ acetic acid ในที่สุด (Pedraja, 1970)

- Glutamic acid ถูกย่อยโดยเชื้อจุลินทรีย์ เกิดเป็น succinic acid , butyric acid และ formic acid

- Arginine ถูกย่อยเป็น ornithine , tetramethylene dianine , α-amino nitrogen , valeric acid และสุดท้ายเกิดเป็น ammonia เนื่องจากการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์

- Proline ถูกย่อยเป็น n-valeric acid และ amino-n-valeric acid

-Tyrosine ถูกย่อยโดยจุลินทรีย์เกิดเป็น cadaverine (pentamethylene diamine) (Pedraja, 1970)

-Tryptophane ถูกย่อยโดยเอนไซม์ Tryptophanaseจากแบคทีเรีย เช่น Esherichia coliและ Proteus morgnii เกิดเป็นสารอินโดลขึ้น

2.1.2 เมื่อกุ้งตาย จะมีการเสื่อมเสียเนื่องมาจากหลายสาเหตุด้วยกันคือ

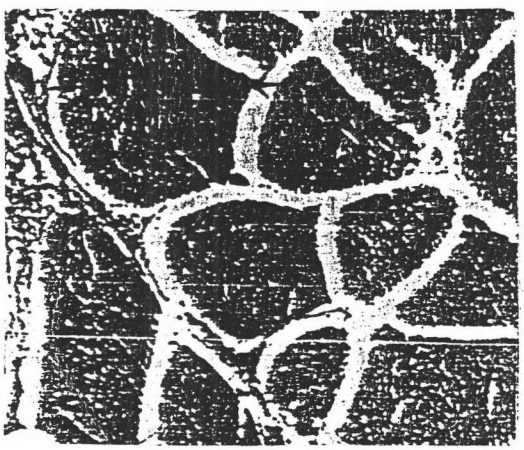
2.1.2.1 การเสื่อมเสียทางกล เช่นการขนย้ายกุ้งในเรือจะมีผลทำให้เกิดการกระทบกระเทือนต่อกล้ามเนื้อกุ้ง ทำให้ของเหลวภายในตัวกุ้งถูกบีบออกมา ประกอบด้วย โปรตีนและกรดอะมิโน ซึ่งเป็นแหล่งอาหารที่สำคัญของเชื้อจุลินทรีย์ (Pedraja, 1970)

2.1.2.2 การเสื่อมเสียเนื่องจากการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งเริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่กุ้งอยู่ในทะเลก่อนที่กุ้งจะถูกจับขึ้นมา หลังจากที่นำกุ้งขึ้นจากน้ำ เมื่อขนย้ายก็จะเกิดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ที่มาจากภาชนะบรรจุ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการจับกุ้งอีก (Pedraja, 1970)

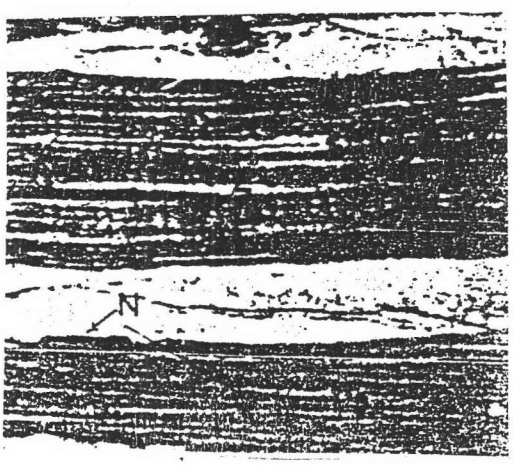
2.1.2.3 การเสื่อมเสียเนื่องจากน้ำย่อย น้ำย่อยที่พบในกุ้ง เช่น Cathepsins, Peptidases, Decarboxylase และ Deaminase ช่วงแรกของการเก็บกุ้ง การย่อยสลายเกิดขึ้นจากน้ำย่อยที่พบในธรรมชาติของเนื้อกุ้งจะไปเร่งการทำงานของน้ำย่อยที่ผลิตขึ้นโดยเชื้อจุลินทรีย์ในการเข้าย่อยสารประกอบโปรตีน เกิดเป็นสารประกอบย่อย (Pedraja, 1970) เช่น Total volatile base nitrogen (TVB-N) สารดังกล่าวใช้เป็นดัชนีวัดความสดของกุ้ง มาตรฐานของญี่ปุ่นกำหนดไว้ให้พบในกุ้งแช่เยือกแข็งได้ไม่เกิน 30 มิลลิกรัมต่อตัวอย่าง 100 กรัม (Hideyuki, 1986)

อนุตรา อัครจามร (2534) ได้ศึกษาลักษณะทางเนื้อเยื่อของกุ้งกุลาดำพบว่าโครงสร้างของกุ้งประกอบด้วย โครงสร้างภายนอกหรือเปลือก (exoskeleton) และเนื้อกุ้งหรือกล้ามเนื้อ (muscle) ซึ่งในส่วนของกล้ามเนื้อจะประกอบด้วยระบบต่าง ๆ ดังนี้คือ ระบบห่อหุ้มร่างกาย ระบบกล้ามเนื้อ ระบบหมุนเวียนของเลือด ระบบหายใจ ระบบย่อยอาหาร ระบบขับถ่าย ระบบประสาทและอวัยวะรับความรู้สึก ระบบต่อมไร้ท่อและระบบสืบพันธุ์ ระบบที่สำคัญคือ ระบบกล้ามเนื้อกุ้ง เพราะเป็นส่วนที่ใช้บริโภค ส่วนนี้ประกอบด้วยกล้ามเนื้อลาย (striated muscle) เพียงชนิดเดียว ซึ่งพบได้ทั่วไปตามลำตัว รอบอวัยวะต่าง ๆ เส้นเลือดและในหัวใจ กล้ามเนื้อลายประกอบด้วย ไมโอไฟบริล (myofibril) จำนวนมาก รวมกันเป็น muscle

fiber ที่มีซาโคเลมมา (sarcolemma) เป็นเยื่อบาง ๆ หุ้มอยู่ ในแต่ละ muscle fiber จะมีนิวเคลียสมากกว่า 1 อัน อยู่บริเวณรอบๆ muscle fiber จะยึดติดกัน คล้ายเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน ที่มีนิวเคลียส ขนาดเล็กและมีแกรนูลมากกว่า เมื่อตัด muscle fiber ตามขวาง จะเห็นนิวเคลียสของ muscle fiber อยู่บริเวณรอบๆ ใต้ชั้น sarcolemma (รูปที่ 2.1) และเมื่อตัด muscle fiber ตามยาวจะเห็นนิวเคลียสมีรูปยาวรีอยู่ที่ผิวของกล้ามเนื้อ และเห็นลายของกล้ามเนื้อมีลักษณะเป็นแถบทึบ (A-band) สลับกับแถบใส (I-band) และมีเส้นทึบ (Z-line) อยู่กลางแถบใส (ภาพที่ 2.2)



รูปที่ 2.1 ภาพตัดขวางของกล้ามเนื้อกุ้ง (นิวเคลียสของ muscle fiber(N) อยู่บริเวณริมๆ ใต้ชั้น sarcolemma (ลูกศร))



รูปที่ 2.2 ภาพตัดตามยาวของกล้ามเนื้อกุ้ง

Myofibril ประกอบด้วย myofilament จำนวนมาก แต่ละ myofilament จะแบ่งเป็นส่วนบาง (actin) และส่วนหนา(myosin) จากการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของ myofilament นี้ ทำให้เกิดลายของกล้ามเนื้อเป็นแถบ ๆ คือ แถบสีเข้ม หรือ A-band ซึ่งประกอบด้วย myosin filament และแถบสีขาว หรือ I-band เป็นส่วนของ actin filament (Briskey and Fukazawa, 1971) โปรตีนในไมโอไฟบริล (myofibrillar protein) เป็นโปรตีนที่สกัดได้โดยใช้สารละลายเกลือที่มีความแรงของไอออนสูงได้แก่ แอคติน

(actin) ไมโอซิน (myosin) โทรโพไมโอซิน (tropomyosin) โทรโพนิน (troponin) แอลฟาแอกตินิน (α-actinin) และเบตาแอกตินิน (β-actinin) ซึ่งโปรตีนในไมโอไฟบริลประกอบด้วย แอกติน 20-25% ไมโอซิน 50-60% โทรโพไมโอซิน 8-10% โทโพนิน 8-10% และมีแอกโตไมโอซิน แอลฟาแอกตินิน และเบต้าแอกตินิน อยู่เล็กน้อย องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อกุ้งแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อกุ้ง (Shelef and Jay, 1971)

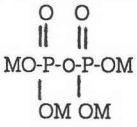
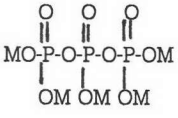
องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละ)
ความชื้น	78.2
โปรตีน	18.1
ไขมัน	0.8
คาร์โบไฮเดรต	1.5
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	2.9
ปริมาณไนโตรเจนในส่วนที่ไม่ใช่โปรตีน	0.81
อัตราส่วนระหว่างโปรตีนต่อปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	0.72
เถ้า	1.4
แคลเซียม (มิลลิกรัม ต่อ 100กรัม)	145-320
แมกนีเซียม(มิลลิกรัม ต่อ 100กรัม)	40-105
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม ต่อ 100กรัม)	270-350
เหล็ก (มิลลิกรัม ต่อ 100กรัม)	1.6
โซเดียม (มิลลิกรัม ต่อ 100กรัม)	140
โปแตสเซียม (มิลลิกรัม ต่อ 100กรัม)	220

2.2 วิธีการเตรียมกุ้งก่อนการแช่เยือกแข็ง

หลังจากจับกุ้งขึ้นมาจากน้ำ เมื่อกุ้งตายจะทำให้เกิดการเสื่อมเสียจากหลายสาเหตุ ดังที่กล่าวในข้างต้น ดังนั้น จึงต้องถนอมรักษาคุณภาพของกุ้งในด้านต่าง ๆ ไม่ให้เกิดการเสื่อมเสียหรือให้เกิดน้อยที่สุด วิธีการถนอมรักษาคุณภาพที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน คือ การแช่เยือกแข็ง กุ้งที่ไม่ได้ผ่านการเตรียมก่อนทำการแช่เยือกแข็ง หลังจากแช่เยือกแข็งแล้ว เมื่อเก็บผลิตภัณฑ์ไว้เป็นระยะเวลาหนึ่ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะเนื้อสัมผัสแห้ง ไม่ชุ่มน้ำ เนื่องจากเกิดการสูญเสียน้ำในระหว่างเก็บรักษา ทำให้ลักษณะปรากฏไม่ดี เนื้อเยื่อภายนอกมีการฉีกขาด และพบว่าเมื่อนำผลิตภัณฑ์ไปละลายน้ำแข็ง (thawing) หรือต้ม (cooking) ผลิตภัณฑ์จะมีการสูญเสียน้ำในปริมาณสูง (สกล กาญจนรังษี และ กอบกิตต์ ฐิตวัฒนกุล, 2532) เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ในวงการอุตสาหกรรมอาหารทะเลแช่เยือกแข็ง ได้มีการนำสารประกอบฟอสเฟตมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ในสหรัฐอเมริกา สารพอลิฟอสเฟต (Polyphosphate) ได้รับการรับรองให้

เป็นสารประกอบของอาหารที่ปลอดภัย (GRAS : Generally Recognized as Safe) สารประกอบที่นิยมใช้ในอาหารทะเลส่วนใหญ่เป็นสารจำพวกพอลิฟอสเฟต ซึ่งมีหลายชนิด เช่น โซเดียมแอซิดไพโรฟอสเฟต (Sodium acidpyrophosphate, SAPP) โซเดียมไตรพอลิฟอสเฟต (Sodium tripolyphosphate, STPP) (สุทธวัฒน์ เบญจกุล, 2536) คุณสมบัติของสารฟอสเฟตที่นิยมใช้ในอาหารทะเลแช่เยือกแข็งแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ชนิด โครงสร้าง พีเอช การละลาย หน้าที่ของ STPP และ SAPP (Ellinger, 1972)

Phosphate name	Basic[a] structure	Generally Accepted	pH (1% solution)	Solubility[b] at 25°C (g/100g water)	Function
Sodium acidpyro phosphate		$Na_5H_2P_2O_7$	4.3	15	Emulsifier, water binding in meats
Sodium tripoly phosphate		$Na_5P_3O_{10}$	9.9	15	Emulsifier, water binding in meats

[a] M stands for one equivalent of a metal ion or hydrogen.

[b] Solubility is higher than 40% but this value is recommended for base of preparation and use.

ผลของการใช้สารพอลิฟอสเฟตในอาหารทะเลมีดังนี้

2.2.1 เพิ่ม moisture retention โดยมีผลต่อโปรตีนของกล้ามเนื้อ โปรตีนของกล้ามเนื้อประกอบด้วย แอกตินและไมโอซิน จัดเรียงตัวกันเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อน สารประกอบฟอสเฟตจะแยกโครงสร้างของโปรตีนและสกัดไมโอซินออกมา ไมโอซินที่ถูกสกัดออกมาสามารถจับกับน้ำได้ดี ซึ่งช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีความสามารถในการอุ้มน้ำเพิ่มขึ้น จึงมีผลช่วยลดการเกิด thawing loss และ cooking loss ในผลิตภัณฑ์ได้ โดยทำให้ส่วนที่เป็นเนื้อของอาหาร สามารถดูดซับของเหลวรอบเซลกลับเข้าไปได้อีกขณะละลายน้ำแข็ง ดังนั้นจึงมีผลช่วยในการรักษาโปรตีนชนิดละลายน้ำ เกลือแร่และวิตามินไว้ในผลิตภัณฑ์ได้ (Deman, 1989)

2.2.2 มีสมบัติในการเป็น sequestering agent สารประกอบฟอสเฟตที่เติมลงไป สามารถไปทำปฏิกิริยากับอิออนของโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้ เช่น ทองแดง และเหล็ก ที่มีอยู่ในอาหาร หรือเกิดจากการปนเปื้อนจากน้ำหรือ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต โลหะเหล่านี้จะเร่งปฏิกิริยาการเกิด Oxidation ของพวก Unsaturated fatty acid ในอาหารได้ (สุทธวัฒน์ เบญจกุล, 2536)

2.2.3 ช่วยเพิ่มแร่ธาตุในอาหาร เนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่มีความสำคัญในการดำรงชีวิต ดังนั้นการเติมลงไปในอาหารจึงเป็นการช่วยเพิ่มคุณค่าของอาหารให้กับผลิตภัณฑ์ (Ellinger, 1972)

2.2.4 ช่วยยืดอายุการเก็บอาหาร สารประกอบฟอสเฟตเป็นวัตถุเจือปนอาหาร (Food Additive) ที่มีผลต่อคุณภาพสินค้า ไม่มีผลโดยตรงต่อการเติมเพื่อเป็นวัตถุกันเสีย (Preservative) แต่มีผลทางอ้อมในการช่วยถนอมอาหารให้เก็บได้นานขึ้น คือ จะไปเสริมฤทธิ์สารปฏิชีวนะ เช่น Tetracycline, Chlortetracycline และ Tyrosine ซึ่งจะยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ และทำปฏิกิริยากับ อนุมูลโลหะ (Metallic ion) ที่จำเป็นสำหรับการเจริญของจุลินทรีย์ ลดปรากฏการณ์ freezer burn ซึ่งเกิดจากการสูญเสียน้ำบริเวณผิวหน้าของอาหาร ลดการสูญเสียน้ำภายหลังการละลายน้ำแข็ง (สุทธวัฒน์ เบญจกุล, 2536)

2.2.5 ช่วยให้ลักษณะเนื้อของผลิตภัณฑ์มีความนุ่มเพิ่มขึ้น(Molin,1991)

ข้อกำหนดการใช้วัตถุเจือปนอาหารในกุ้งแช่เยือกแข็ง

โซเดียมไทรพอลิฟอสเฟต โซเดียมแอซิดไพโรฟอสเฟต และแคลเซียมคลอไรด์ ปริมาณสูงสุดที่ยอมให้มีในอาหารได้คือ ไม่เกิน 5 กรัมต่อกิโลกรัม 5 กรัมต่อกิโลกรัม และ 2.5 กรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ (Richard, 1989)

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมกุ้งก่อนแช่เยือกแข็ง

Falci และScott (1980) พบว่า การใช้สารละลายเกลือแกงที่มีฟอสเฟตผสมเพียงอย่างเดียวนี้ถึงแม้จะสามารถลดอัตราการสูญเสียน้ำในกุ้งแช่เยือกแข็งได้ แต่เมื่อนำผลิตภัณฑ์มาทำให้สุก ผลิตภัณฑ์จะมีลักษณะเนื้อขาวคล้ำ มองดูคล้ายของดิบ (Translucent) เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้ทดลองใช้ $CaCl_2$ ร่วมกับ STPP ซึ่งพบว่านอกจากจะสามารถลดอัตราการเสียน้ำในกุ้งได้แล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะขาวขุ่น (Opaque) ชุ่มน้ำ เนื้อสัมผัสนุ่มเป็นธรรมชาติ เนื้อเยื่อภายนอกไม่มีการฉีกขาด และรสชาติเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค โดยระดับความเข้มข้นของ STPP ที่เหมาะสมคือ 4-7% $CaCl_2$□

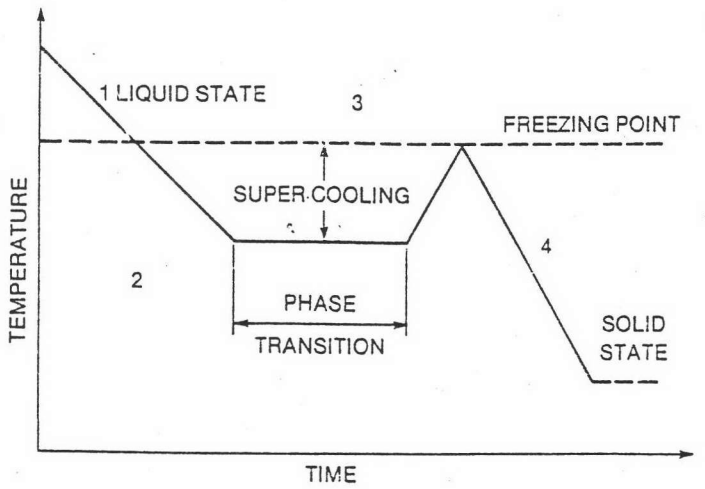
Shimp, Robbinsville และSteinhauer (1983) พบว่า การแช่กุ้งในสารละลาย STPP ร่วมกับ SAPP ในอัตราส่วน 75:25 ถึง 65:35 โดยใช้สารละลายเข้มข้น 5-7 % จะช่วยลดการเกิด Translucent ได้

2.3 กรรมวิธีแช่เยือกแข็ง

การแช่เยือกแข็ง เป็นวิธีการถนอมอาหารวิธีหนึ่ง ซึ่งสามารถรักษากลิ่นรส สี และคุณค่าทางอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่จะสามารถรักษาลักษณะเนื้อสัมผัสไว้ได้ปานกลางเท่านั้น แม้วิธีการแช่เยือกแข็งจะเป็นวิธีที่ดีในการถนอมอาหาร เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการถนอมอาหารวิธีอื่น แต่ก็ยังมีผลในการ

ทำลายผลิตภัณฑ์ที่นำไปแช่เยือกแข็ง ซึ่งความรุนแรงของการทำลายนั้นขึ้นกับลักษณะของกระบวนการแช่เยือกแข็ง และลักษณะของผลิตภัณฑ์ (ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาสิก, 2532)

การแช่เยือกแข็ง เป็นการทำให้น้ำในอาหารเปลี่ยนเป็นน้ำแข็งถ้าอุณหภูมิที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งยิ่งสูง จะสามารถทำให้น้ำเปลี่ยนเป็นน้ำแข็งได้มากขึ้น โดยพบว่าการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -14.9 °C จะสามารถทำให้น้ำเปลี่ยนเป็นน้ำแข็งได้ 80% ในขณะที่การแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -30.8 °C นั้นสามารถทำให้น้ำเป็นน้ำแข็งได้ 90% (Mallett, 1993) ปรากฏการณ์ที่น้ำในอาหารเปลี่ยนเป็นน้ำแข็งอธิบายได้ดังรูปที่ 3 ดังนี้ (Harder, 1979)



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงสถานะของสารละลายในผลิตภัณฑ์ระหว่างการแช่เยือกแข็ง

ขั้นตอนที่ 1 ผลิตภัณฑ์มีการระบายความร้อนออกไป ทำให้ส่วนของน้ำในอาหารอยู่ในสถานะของเหลวมีอุณหภูมิลดต่ำลง ขั้นตอนนี้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากน้ำไปเป็นผลึกน้ำแข็ง

ขั้นตอนที่ 2 อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะลดต่ำลงจากจุดเยือกแข็ง แต่น้ำในผลิตภัณฑ์ยังอยู่ในสถานะของเหลวอยู่ เรียกจุดนี้ว่าจุดเย็นตัวยวดยิ่ง (super cooling) ซึ่งเป็นจุดที่สารละลายภายในผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งแต่ไม่เกิดผลึกน้ำแข็ง จุดเย็นตัวยวดยิ่งนี้ไม่จำเป็นต้องพบเสมอไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ ความไว การสนองต่อเวลา และตำแหน่งของเครื่องวัดอุณหภูมิ

ขั้นตอนที่ 3 หลังจากจุดเย็นตัวยวดยิ่งผ่านไปเล็กน้อย ผลิตภัณฑ์จะเกิดความร้อนเนื่องจากการเกิดผลึกน้ำแข็ง ทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สูงขึ้นและเริ่มเกิดผลึกน้ำแข็ง นั่นคือเกิดจุดเยือกแข็ง (Freezing point) ขึ้น อาหารแต่ละชนิดจะมีจุดเยือกแข็งแตกต่างกันไป ดังตารางที่ 2.3

ขั้นตอนที่ 4 เป็นช่วงเวลาที่น้ำในผลิตภัณฑ์ เปลี่ยนไปเป็นผลึกน้ำแข็งจนกระทั่งมีอุณหภูมิคงที่ซึ่งเมื่อถึงจุดนี้น้ำในอาหารเปลี่ยนเป็นน้ำแข็งได้ไม่หมด ปริมาณน้ำที่จะเปลี่ยนไปเป็นน้ำแข็งนั้นขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด

ตารางที่ 2.3 ปริมาณน้ำและจุดเยือกแข็งของอาหารบางชนิด (Harder, 1979)

Product	% water	Average Freezing Point (°C)
Poultry(fresh)	74	-2.78
Beef(fresh)	68	-1.67
Pork(fresh)	60	-2.22
Apples	84.1	-2.00
Bananas	74.8	-2.22
Mangoes	93	-2.22
Tuna	70	-2.22
Scallop Meat	80	-2.22
Shrimp	83	-2.22
Oyster(meat)	87	-2.22
Asparagus	93	-1.22
Broccoli	89.9	-1.56
Carrots	88.2	-1.33

ในปัจจุบันวิธีการแช่เยือกแข็งมีหลายวิธีด้วยกัน ซึ่งแต่ละวิธีจะมีอัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งต่างกัน รายละเอียดมีดังนี้

อัตราเร็วของการแช่เยือกแข็ง คือ อัตราส่วนระหว่างระยะทางสั้นที่สุดจากผิวถึงจุดกึ่งกลาง (ความหนา)ของผลิตภัณฑ์ และเวลาที่ใช้ตั้งแต่อุณหภูมิที่ผิวของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 0 °C จนกระทั่งอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของผลิตภัณฑ์ลดต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์อีก 10 °C โดยที่ความหนาของผลิตภัณฑ์มีหน่วยเป็น เซนติเมตร และเวลามีหน่วยเป็นชั่วโมง อัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งจะแสดงอยู่ในรูปเซนติเมตรต่อชั่วโมง วิธีแช่เยือกแข็งมีหลายวิธี โดยแต่ละวิธีจะมีช่วงอัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งมีตั้งแต่น้อยกว่า 0.2 ถึง 100 เซนติเมตรต่อชั่วโมง จัดเรียงอัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งได้ตามลำดับดังนี้ น้อยกว่า 0.2 เซนติเมตรต่อชั่วโมง คือ การแช่เยือกแข็งช้า เช่นการแช่เยือกแข็งด้วยตู้เย็น, Still air freezing Air blast freezing, Contact plate freezing 0.5 ถึง 3 เซนติเมตรต่อชั่วโมง คือ การแช่เยือกแข็งค่อนข้างเร็ว เช่นการแช่เยือกแข็งด้วย Air blast freezing, Contact plate freezing 5 ถึง 10 เซนติเมตรต่อชั่วโมง คือการแช่เยือกแข็งเร็ว และ 10 ถึง 100 เซนติเมตรต่อชั่วโมง คือ การแช่เยือกแข็งเร็วมาก เช่น การแช่เยือกแข็งด้วยไนโตรเจนเหลว (IIR,1972)

ทั้งนี้ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็วของการแช่เยือกแข็ง (Heldman, 1983) ได้แก่

- ขนาดของผลิตภัณฑ์ เวลาสำหรับการแช่เยือกแข็งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของผลิตภัณฑ์

- อุณหภูมิของตัวกลางในการแช่เยือกแข็ง การลดอุณหภูมิตัวกลางในขณะแช่เยือกแข็งให้ต่ำลงจะช่วยเพิ่มแรงขับ (Driving force) ในการระบายความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้นทำให้เวลาสำหรับการแช่เยือกแข็งของผลิตภัณฑ์สั้นลง

- อุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในช่วง 5 ถึง 15 °C จะมีผลต่อเวลาสำหรับการแช่เยือกแข็งเพียงเล็กน้อย อุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ยิ่งต่ำอัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งจะเร็วขึ้น

- สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแห่งการพา เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแห่งการพามีค่าต่ำลงเวลาสำหรับการแช่เยือกแข็งจะยิ่งนานขึ้น

วิธีการแช่เยือกแข็ง ในปัจจุบันมีวิธีที่ใช้เพื่อแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ อยู่หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งแต่ละวิธีจะมีอัตราเร็วของการแช่เยือกแข็ง (Freezing rate) แตกต่างกันและมีการปรับปรุงเพื่อให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่นำมาแช่เยือกแข็งแต่ละชนิด วิธีแช่เยือกแข็งที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีดังนี้

1. วิธีแช่เยือกแข็งด้วยลมเย็น (Air blast freezing)

- Still air freezing หรือ Slow freezing (ASHRAE, 1978) เป็นวิธีแช่เยือกแข็งโดยอาศัยลมเย็นอุณหภูมิต่ำมีการหมุนเวียนอย่างช้าๆ หรือไม่มีการหมุนเวียนของลมเลยเป็นตัวให้ความเย็น

- Air blast freezing (Fennema, Kerel, and Lund, 1975) เป็นวิธีแช่เยือกแข็งที่อาศัยลมเย็นเป็นตัวกลางเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง พัดผ่านหมุนเวียนอยู่เหนือผลิตภัณฑ์อาหาร โดยลมเย็นเป็นตัวนำความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์อาหาร อัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งจะขึ้นกับความเร็วลม อุณหภูมิของลมเย็นและอุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ที่นำมาแช่เยือกแข็ง

- Fluidized-bed freezing (Fennema, et al., 1975) อาหารที่นำมาแช่เยือกแข็งด้วยวิธีนี้จะต้องเป็นของแข็งขนาดเล็กเท่านั้น โดยมีหลักการคือ ทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารลอยตัวด้วยลมเย็นที่ออกจากด้านล่างผ่านชั้นของตะแกรงที่วางผลิตภัณฑ์ วิธีนี้มีอัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งเร็วกว่าวิธีแช่เยือกแข็งแบบ Air blast freezing ทำให้ผลิตภัณฑ์สูญเสียน้ำหลังจากแช่เยือกแข็งน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์

2. วิธีแช่เยือกแข็งด้วยแผ่นโลหะเย็น (Fennema, et al., 1975) ผลิตภัณฑ์อาหารที่นำมาแช่เยือกแข็งจะถูกจัดวางไว้ระหว่างแผ่นโลหะเย็นซึ่งทำให้เย็นโดยผ่านน้ำเกลือที่เย็นจัด หรือไอของสารทำความเย็น เช่น R-22 (monodichlorodifluoromethane) R-12 (dichlorodifluoromethane) หรือแอมโมเนีย ความร้อนจากผลิตภัณฑ์อาหารจะถูกระบายออกโดยตรงด้วยวิธีการนำความร้อนด้วยแผ่นโลหะเย็น

3. วิธีแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิก เป็นวิธีแช่เยือกแข็งที่ใช้อุณหภูมิในการแช่เยือกแข็งต่ำมากจึงทำให้มีอัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งสูง ผลิตภัณฑ์ที่นำมาแช่เยือกแข็งจะบรรจุในภาชนะที่เป็นวัสดุชนิดแผ่นฟิล์มบางหรือไม่บรรจุในภาชนะก็ได้ นำมาสัมผัสกับตัวทำความเย็นที่เย็นจัด และจะเกิดการเปลี่ยนสถานะของตัวทำความเย็น เนื่องจากเกิดการระบายความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์ไปใช้ในการเปลี่ยนสถานะ สารทำความเย็นที่ใช้ เช่น ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนไนตรัสออกไซด์ก็นำมาใช้เช่นกันแต่ไม่นิยมใช้

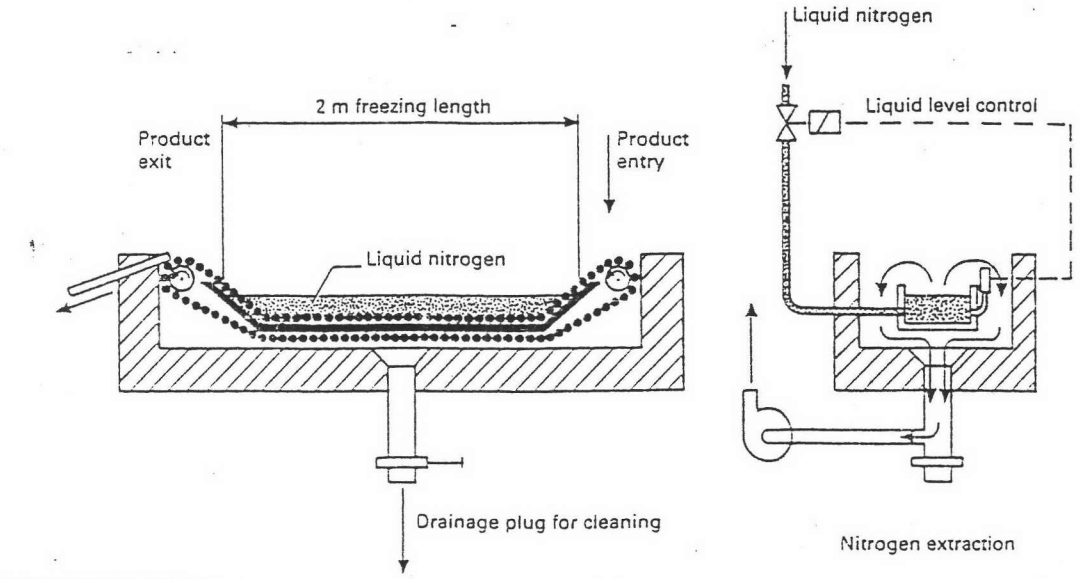
ทางการค้า ชนิดและคุณสมบัติของตัวทำความเย็นชนิดต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 2.4 (Fennema, et al., 1975)

ตารางที่ 2.4 สมบัติบางประการของตัวทำความเย็นชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในวิธีแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิก

Property	Freezant				
	CO_2		N_2O	CCl_2F_2	N_2
Molecular weight	44.01		44.02	12.09	28.01
Boiling point 1 atm(°F)	-109.3		-129.1	-21.62	-320.46
Latent heat at boiling	solid	liquid	(vap.)	(vap.)	(vap.)
point (Btu/lb.)	(subl.)	(vap.)			
	246.1	149.6at-69.9°F	161.8	71.04	83.8
Specific heats gas,	0.1988	0.1988	0.2004	0.145	0.2447
Cp at 1 atm (Btu/lb.°F)	at 60°F	at 60°F	at 60°F	at 60°F	at 60°F
Usable heat capacity(Btu/lb.)	264	150	184	71	161

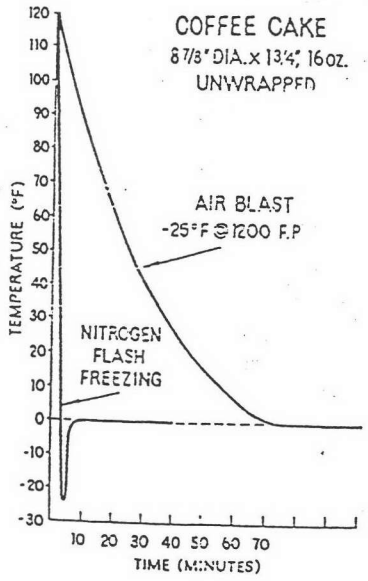
สำหรับการแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิกด้วยไนโตรเจน ระบบการแช่เยือกแข็งด้วยไนโตรเจนเหลว (Norman and Donald, 1977) สามารถแบ่งได้ดังนี้

- การจุ่มในไนโตรเจนเหลว (Liquid immersion freezing) เป็นวิธีการแรกสุดที่เริ่มมีการใช้การแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิก โดยการจุ่มผลิตภัณฑ์ลงในไนโตรเจนเหลว วิธีนี้มีอัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งมาก คือ มากกว่า 100°C ต่อนาที และใช้เวลาในการจุ่ม (Immersion time) ประมาณ 5-10 วินาที จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิถึง -18°C ได้มีการศึกษาใช้กับสตรอเบอรี่ พบว่า สตรอเบอรี่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหลังจากเก็บรักษาไว้แล้วละลายผลึกน้ำแข็ง เครื่องแช่เยือกแข็งแบบ Liquid immersion freezing (Norman and Donald, 1977) แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบ Liquid Immersion Freezing

- การฉีดพ่นด้วยไนโตรเจนเหลว (A spray of liquid nitrogen) ผลิตภัณฑ์จะถูกฉีดพ่นด้วยไนโตรเจนเหลวซึ่งมี boiling point -196 °C แล้วเกิดการเปลี่ยนสถานะของไนโตรเจนเหลวกลายเป็นแก๊ส ทำให้ผลิตภัณฑ์อยู่ในสภาวะแช่เยือกแข็งทันที การแช่เยือกแข็งด้วยการฉีดพ่นไนโตรเจนเหลวมีอัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งเร็วมาก ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นผลการทดลองของการใช้วิธีการแช่เยือกแข็งต่างกัน (Norman and Donald, 1977)



รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็ง coffee cake หลังผ่านวิธีการแช่เยือกแข็งต่างกัน

จากรูปจะพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที เค้กกาแฟที่นำมาแช่เยือกแข็งด้วยการฉีดพ่นโดยไนโตรเจนเหลวจะมีอุณหภูมิลดต่ำลง และเกิดจุดเยือกแข็งเร็วมาก ในขณะที่การแช่เยือกแข็งเค้กกาแฟด้วย Air blast freezer เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที ผลิตภัณฑ์เพียงแค่มีอุณหภูมิลดต่ำลง และสารละลายภายในผลิตภัณฑ์ยังอยู่ในสถานะของเหลวเท่านั้น (Norman and Donald, 1977)

- การพัดผ่านหมุนเวียนของไอไนโตรเจน (Circulation of very cold nitrogen vapors over the product) เป็นการแช่เยือกแข็งโดยใช้ไอของไนโตรเจนเหลว ซึ่งวิธีนี้ไนโตรเจนเหลวจะไม่สัมผัสโดยตรงกับอาหาร แต่จะถูกพัดผ่านหมุนเวียนด้วยความเร็วสูงอยู่เหนือผลิตภัณฑ์อาหาร แล้วนำความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์อาหาร (Norman and Donald, 1977)

ข้อดี ของวิธีแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิกด้วยไนโตรเจน (Fennema, et al., 1975) คือ เกิดการสูญเสียน้ำ (dehydration) น้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ระบบนี้ป้องกันออกซิเจน ไม่ให้ผ่านเข้าไปในห้องแช่เยือกแข็งระหว่างการแช่เยือกแข็ง และ เครื่องมือไม่สลับซับซ้อน เหมาะที่จะใช้กับการผลิตแบบต่อเนื่อง สามารถปรับอัตราเร็วของการผลิตและใช้ได้กับผลิตภัณฑ์หลายชนิด ข้อเสีย ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูง เนื่องจากไนโตรเจนเหลวมีราคาแพง (Fennema, et al., 1975)

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้วิธีการแช่เยือกแข็งต่างกัน

คุณภาพของกุ้งแช่เยือกแข็งที่ได้จากการใช้วิธีแช่เยือกแข็งที่มีอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งต่างกัน ได้มีผู้ศึกษาไว้ดังต่อไปนี้ คือ

Bjorn and Erla (1976) ได้ทำการศึกษาคุณภาพของกุ้งต้มสุกเยือกแข็งที่ผ่านการใช้วิธีการแช่เยือกแข็งด้วย Liquid freezant (LFF) freezer, Plate freezer และ Air blast tunnel freon พบว่า การแช่เยือกแข็งด้วย LFF ซึ่งมีอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งเร็วที่สุด จะใช้เวลาน้อยที่สุดที่จะทำให้จุดกึ่งกลางของกุ้งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง -20 ^{o}C ถึง -30 ^{o}C ภายใน 50 วินาที ในขณะที่อีก 2 วิธีใช้เวลา 6 นาที และ 30 นาที ตามลำดับ นอกจากนี้ การสูญเสียน้ำหนักหลังแช่เยือกแข็ง (freezing loss) เท่ากับ 0.8%,1.3%และ1.2% ตามลำดับ และการสูญเสียน้ำหนักหลังละลายผลึกน้ำแข็ง (thawing loss) เท่ากับ 1.3%,1.9% และ1.5% ตามลำดับ .เมื่อตรวจวัดจำนวนจุลินทรีย์หลังแช่เยือกแข็งจะพบว่า การใช้ LFF จะมีผลในการทำลายจุลินทรีย์น้อยที่สุด

. Giddings และ Hill (1978) ได้ทำการศึกษาผลของการใช้วิธีการแช่เยือกแข็งที่มีอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งต่างๆ ที่มีผลต่อโครงสร้างของกุ้งหลังผ่านการแช่เยือกแข็งทันทีและเมื่อผ่านการเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลาหนึ่ง พบว่าการแช่แข็งแบบ Rapid freezing คือ Liquid nitrogen freezing มีผลในการทำลายโครงสร้างของกุ้งหลังผ่านการแช่เยือกแข็งน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการแช่เยือกแข็งแบบ Slow freezing ที่อุณหภูมิ -10 ^{o}C ซึ่งจะทำให้เกิดช่องว่างของการเกิดผลึกน้ำแข็งขึ้นมากที่สุด ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่มีผลในการทำลายลักษณะโครงสร้างของอาหารและเกิดอยู่ภายนอกเซล (extracellular) ผิวของกุ้งเกิดการแห้ง (dehydration) หดตัว (shrinkage) และยึดติดกันแน่น (compaction) ซึ่งส่งผลให้กุ้งที่นำมาบริโภค มีเนื้อสัมผัสเหนียว ส่วนการแช่เยือกแข็งด้วย Liquid nitrogen freezing นี้จะทำให้เกิดผลึก

น้ำแข็งขนาดเล็กภายในเซล (intracellular) เกิดการทำลายลักษณะโครงสร้างของอาหารน้อยมาก ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นภายในเซลทำให้ยังคงมีน้ำเหลืออยู่ในเนื้อเยื่อหลังละลายผลึกน้ำแข็งแล้ว เมื่อนำมาผ่านการละลายน้ำแข็งจะมีลักษณะใกล้เคียงของสดมากที่สุด

2.4 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็งระหว่างการเก็บรักษา

คุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็งขึ้นกับ ลักษณะธรรมชาติของผลิตภัณฑ์ก่อนนำมาแช่เยือกแข็ง วิธีการเตรียมผลิตภัณฑ์ก่อนนำมาแช่เยือกแข็ง วิธีการแช่เยือกแข็ง ภาชนะบรรจุผลิตภัณฑ์ และสภาวะที่ใช้ในการเก็บผลิตภัณฑ์ ในระหว่างการแช่เยือกแข็งจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในอาหารทั้งทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวเคมี ซึ่งเป็นสาเหตุให้อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงมีผลให้คุณภาพลดลง

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างการเก็บรักษาที่สำคัญและมีผลต่อคุณภาพอาหารมีดังนี้ (Macrae, 1993)

2.4.1 การสูญเสียน้ำ ในระหว่างการเก็บรักษาน้ำบริเวณผิวหน้าของอาหารจะระเหยกลายเป็นไอไปสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำมีผลให้น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ลดลง ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Freezer burn ขึ้น

2.4.2 การสูญเสียสารประกอบที่ระเหยได้ เป็นสารที่ให้กลิ่น(aroma) ของอาหาร โดยเกิดการระเหยจากผิวหน้าของอาหารไปสู่สิ่งแวดล้อมในระหว่างการเก็บรักษา(storage) การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่ำจะช่วยสามารถลดการสูญเสียสารประกอบที่ระเหยได้ ไว้ได้

2.4.3 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของไขมัน ทำให้เกิดกลิ่นที่ไม่ต้องการขึ้นในผลิตภัณฑ์ พบมากในอาหารประเภท ปลา และผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์

2.4.4 การเสื่อมเสียของโปรตีน (denature) ในระหว่างการเก็บรักษา เกิดการเปลี่ยนแปลงในส่วนของ myofibrillar proteins นั่นคือ myosin มีความสามารถในการละลายลดลง ในระหว่างการเก็บรักษา ทำให้การจับตัวกันของกล้ามเนื้อลดลง มีผลให้เกิดการสูญเสียน้ำจากเนื้อเยื่อเมื่อนำผลิตภัณฑ์ไปละลายผลึกน้ำแข็ง

อาหารที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแล้ว ถึงแม้จะถูกเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ -10 °C สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย แต่ก็ยังมีปฏิกิริยาของเอ็นไซม์เกิดขึ้นช้า ๆ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพขึ้น ถึงแม้ว่าอุณหภูมิจะลดต่ำลงถึง -70 °C นอกจากนี้ยีสต์ยังสามารถเจริญได้จนถึง -12 °C และรายังเจริญได้ที่อุณหภูมิ -18 °C ดังนั้นจึงควรเก็บผลิตภัณฑ์ไว้ที่อุณหภูมิ -18 °C หรือต่ำกว่า (สกล และกอบกิตต์, 2532) อุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษาอาหารมีความสำคัญเพราะการแช่เยือกแข็งที่ใช้อุณหภูมิยิ่งต่ำจะมีผลทำให้เกิดน้ำอิสระและการเกิด recrystallization น้อยดังนั้นเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิยิ่งต่ำจึงมีผลให้สามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ได้นานขึ้น แสดงได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเก็บรักษากุ้งต้มสุกเยือกแข็ง (Mallett, 1993)

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (เดือน)
-12	2
-18	5
-24	มากกว่า 9

การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็ง นอกจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บควรต่ำแล้วยังต้องพิจารณาถึงภาชนะที่ใช้บรรจุด้วย เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นในระหว่างการเก็บรักษา โดยภาชนะที่ใช้บรรจุควรป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ และเมื่อบรรจุควรให้ผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งนั้นแนบสนิทติดกับภาชนะ ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการสูญเสียความชื้น ในระหว่างการเก็บรักษาได้ ถ้าผลิตภัณฑ์อาหารถูกบรรจุอยู่ในภาชนะบรรจุที่ไม่เหมาะสม จะมีการระเหิดของน้ำแข็งบริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ ทำให้ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์มีลักษณะแห้ง เป็นจุดน้ำตาล ซึ่งเรียกว่า "Freezer burn" ดังนั้นเพื่อป้องกันหรือลดการเกิดปัญหาดังกล่าว ควรเก็บผลิตภัณฑ์ในที่ที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง ใช้น้ำเคลือบผลิตภัณฑ์ หรือบรรจุผลิตภัณฑ์ลงในภาชนะที่กันการซึมผ่านของไอน้ำได้ (Mallett, 1993)

Riacry และ Qadri (1990) ศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงจำนวนจุลินทรีย์ของกุ้งแช่เยือกแข็งที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ -6.7, -15 และ - 29 °C ระยะเวลา 6 เดือน พบว่าการเก็บกุ้งแช่เยือกแข็งไว้ที่อุณหภูมิ -29 °C จะทำให้มีจำนวนจุลินทรีย์เหลืออยู่ในปริมาณน้อยที่สุด และพบว่า pH ที่วัดได้จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ซึ่ง pH ของกุ้งแช่เยือกแข็งหลังผ่านการเก็บที่อุณหภูมิ -6.7 °C มีค่าเพิ่มมากกว่ากุ้งเยือกแข็งที่ผ่านการเก็บที่อุณหภูมิ -15 °C และ -29 °C ตามลำดับ

2.5 **การละลายน้ำแข็ง**

วิธีในการละลายผลึกน้ำแข็งมี 2 หลักการ คือ (IIR, 1972)

1. การนำความร้อนจากผิวไปสู่ภายในผลิตภัณฑ์ โดยจัดผลิตภัณฑ์ให้สัมผัสกับแหล่งให้ความร้อน เช่นแผ่นโลหะร้อน อากาศร้อน น้ำอุ่น หรือ ไอน้ำภายใต้สุญญากาศ
2. การสร้างความร้อนให้เกิดขึ้นภายในผลิตภัณฑ์ เช่น การใช้ไมโครเวฟ

ในระหว่างการละลาย อาหารแช่เยือกแข็งมีแนวโน้มที่จะเกิดการเสื่อมเสีย อันเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี กายภาพ และจุลินทรีย์ได้ โดยคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็งหลังละลายผลึกน้ำแข็งจะขึ้นกับวิธีการที่ใช้ในการละลายน้ำแข็ง คุณภาพของอาหารก่อนการแช่เยือกแข็ง และวิธีการที่ใช้ในการแช่เยือกแข็ง