

ผลของกระบวนการแช่เยือกแข็งต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของกิ้งกูดำ
(*Penaeus monodon*) ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นและแบบโครโอจินิก



นางสาวศิรินทรา บุญสำเร็จ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-17-0176-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF FREEZING PROCESS ON THE QUALITY CHANGES OF TIGER SHRIMP
(*Penaeus monodon*) FROZEN BY AIR-BLAST AND CRYOGENIC FREEZING

Miss Sirintra Boonsumrej



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Food Technology

Department of Food Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-17-0176-4

ศิรินทรา บุญสำเร็จ : ผลของกระบวนการแช่เยือกแข็งต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon*) ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นและแบบโครโอจีนิก (EFFECTS OF FREEZING PROCESS ON THE QUALITY CHANGES OF TIGER SHRIMP (*Penaeus monodon*) FROZEN BY AIR-BLAST AND CRYOGENIC FREEZING) อ.ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ ตันตระเจียร. 104 หน้า, ISBN 974-17-0176-4

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการแช่เยือกแข็งกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon*) ด้วยวิธีแบบลมพ่นและแบบโครโอจีนิก ตลอดจนผลของวิธีการละลายน้ำแข็ง และการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ (freeze-thaw cycles) ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านเคมีและกายภาพของกุ้งกุลาดำโดยในวิธีการแช่เยือกแข็งแบบลมพ่นได้แปรความเร็วลมเย็นที่ใช้เป็น 4 ถึง 8 เมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิ -28 ± 2 องศาเซลเซียส และวิธีการแช่เยือกแข็งแบบโครโอจีนิกได้แปรอุณหภูมิในการแช่เยือกแข็งเป็น -70 ถึง -100 องศาเซลเซียส คัดเลือกภาวะที่เหมาะสมในแต่ละวิธีการแช่เยือกแข็งโดยพิจารณาจากอัตราเร็วที่ใช้ในการแช่เยือกแข็ง ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็ง (%FL) และแรงต้านทานการตัดขาดในกุ้งที่ละลายน้ำแข็งแล้ว (CF) ในการศึกษาวิธีละลายน้ำแข็งได้เปรียบเทียบการละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟและการละลายที่อุณหภูมิตู้เย็น (ประมาณ 5 องศาเซลเซียส) การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำได้ทำ 4 ครั้ง และติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านเคมีและกายภาพ ได้แก่ ค่า Thiobarbituric acid number (TBA) ปริมาณค่าทั้งหมดที่ระเหยได้ (TVB) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ในสารละลายเกลือ (SSP) ค่าร้อยละการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็ง (%TL) และค่าแรงต้านทานการตัดขาด พบว่าการแช่เยือกแข็งแบบลมพ่นมีอัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งเป็น 6.85-7.42 เซนติเมตร/ชั่วโมง โดยที่ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที %FL มีค่าน้อยที่สุดและ CF มีค่าไม่แตกต่างกับกุ้งกุลาดำสดอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ในขณะที่การแช่เยือกแข็งแบบโครโอจีนิกมีอัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งเป็น 11.82-21.98 เซนติเมตร/ชั่วโมง ทุกอุณหภูมิที่ใช้ไม่มีผลต่อค่า %FL โดยกุ้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -70 องศาเซลเซียสมีค่า CF ไม่แตกต่างกับกุ้งกุลาดำสดอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เมื่อนำกุ้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งตามภาวะที่คัดเลือกแล้วจากทั้งสองวิธีมาละลายน้ำแข็งพบว่าวิธีการละลายน้ำแข็งไม่มีผลต่อค่า pH SSP และ CF แต่มีผลต่อค่า TBA โดยการละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟจะให้ค่า TBA สูงกว่าการละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิตู้เย็น การเพิ่มจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำทำให้ค่า TBA pH และ CF เพิ่มขึ้น แต่ค่า SSP ลดลง ผลรวมของวิธีการละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำมีผลต่อค่า TVB และ %TL โดยการละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟจะให้ค่า %TL สูงกว่าการละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิตู้เย็น และเมื่อจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า TVB และ %TL เพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเนื้อเยื่อด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิธีทาง Histology โดยการส่องกล้องจุลทรรศน์ในกุ้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจีนิกตามภาวะที่คัดเลือกแล้วพบว่ากุ้งที่ผ่านจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำเพิ่มขึ้นมีระยะห่างระหว่าง muscle fiber เพิ่มขึ้น และ muscle fiber bundle เรียงตัวกันอย่างไม่ต่อเนื่องและขาดออกจากกัน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนในกุ้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำตั้งแต่ 2 ครั้งขึ้นไป

ภาควิชา.....เทคโนโลยีทางอาหาร.....ลายมือชื่ออธิบดี.....
 สาขาวิชา.....เทคโนโลยีทางอาหาร.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา.....2544.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4172458923 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEY WORD : SHRIMP/ FREEZING/ THAWING/ FREEZE-THAW CYCLES/ PHYSICO-CHEMICAL CHANGES

SIRINTRA BOONSUMREJ : EFFECTS OF FREEZING PROCESS ON THE QUALITY CHANGES OF

TIGER SHRIMP (*Penaeus monodon*) FROZEN BY AIR-BLAST AND CRYOGENIC FREEZING,

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SAIWARUN CHAIWANICHSIRI, Ph. D., THESIS CO-ADVISOR :

ASST. PROF. SUMATE TANTRATIAN, Ph. D., 104 pp. ISBN 974-17-0176-4

The effects of freezing by air-blast freezer and cryogenic freezer, as well as the effects of thawing methods and freeze-thaw cycles on the chemical and physical changes of the tiger shrimp (*Penaeus monodon*) were investigated. The air-blast freezing was done at the temperature of -28 ± 2 °C and the air velocity of 4-8 m/s while the cryogenic freezing was done at the temperature of -70 ° - (-100) °C. The optimum conditions for both freezing methods were considered from the freezing rate, % freezing loss (%FL) and cutting force (CF) of thawed samples. The samples frozen under the selected conditions were thawed under microwave and under refrigerator (temperature ~ 5 °C). The freeze-thaw effect was studied up to 4 cycles and the changes in chemical and physical properties, i.e. thiobarbituric acid number (TBA), total volatile base (TVB), pH, salt-soluble protein content (SSP), % thawing loss (%TL), and cutting force were measured. The results showed that freezing by the air-blast freezer gave the freezing rate of 6.85-7.42 cm/h while using the cryogenic freezer gave 11.82-21.98 cm/h. Samples frozen at the air velocity of 6 m/s had the least %FL and similar CF to the fresh samples. All temperatures used for cryogenic freezing showed no effect on %FL with the samples frozen at -70 °C had the similar CF as the fresh samples. For the shrimps frozen under the selected conditions of both freezing methods, it was found that thawing method did not affect pH, SSP and CF. Samples thawed under the microwave thawing had higher TBA than those thawed under refrigerator temperature. Increasing the number of freeze-thaw cycles increased the TBA, pH and CF values but decreased the SSP. The combined effect of thawing method and freeze-thaw cycles showed to affect TVB and %TL. Samples thawed under the microwave had higher %TL than those thawed under refrigerator temperature. Increasing the number of freeze-thaw cycles increased TVB and %TL values. For the Scanning Electron Microscopy (SEM) and histological studied under light microscope of shrimps frozen under cryogenic at the selected conditions, it was found that the spacing between the muscle fiber increased and the muscle fiber bundles were torn as the number of freeze-thaw cycles increased. These changes were obvious when the samples were freeze-thawed more than two cycles.

Department.....Food Technology.....Student's signature.....

Field of study....Food Technology.....Advisor's signature.....

Academic year.....2001.....Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จได้ เนื่องจากความอนุเคราะห์ของหลายๆ ท่าน ผู้วิจัยขอกราบ
ขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ ตันตระเจียร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม เป็นอย่างสูงที่กรุณาให้คำปรึกษา
คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ตลอดระยะเวลาในการวิจัย ตลอดจนตรวจสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์
จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กัลยา เลหาสงคราม ประธานกรรมการสอบ
วิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยยุทธ ัญญพิทยากุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พาสวดี ประ
ทีปะเสน ที่ได้สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์เพื่อทำ
ให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณ สุภิมารส และบริษัทบางกอกอินดัส
เทรียลแก๊ส ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และไนโตรเจนเหลวในการวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ Dr.Tung-Wei Lu บริษัท Keystone Foods จำกัด และ ดร. บัณฑิต
เรืองตระกูล ผู้จัดการฝ่ายเทคนิคและประกันคุณภาพ บริษัทแหลมทองสหการจำกัด ที่กรุณาให้
คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในการวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิเศษ เบญจณี พันธุ์ภูวงศ์ ดร.อุไร ไชยศรี
ภาควิชาพยาธิวิทยาเขตร้อน คณะเวชศาสตร์เขตร้อน มหาวิทยาลัยมหิดล และคุณรุจิพร ประทีป
เสน ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความ
อนุเคราะห์ในการวิเคราะห์ลักษณะทางเนื้อเยื่อด้วยวิธีทาง Histology และการใช้กล้องจุลทรรศน์
อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ขอกราบขอบพระคุณ บริษัท จาร์พา เทค เซ็นเตอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้
เครื่องมือวัดลักษณะเนื้อสัมผัส

ขอกราบขอบพระคุณทบวงมหาวิทยาลัย และคณะกรรมการบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้จัดสรร
ทุนอุดหนุนงานวิจัยบางส่วน

ขอขอบคุณ คุณพงศธร รัชชิต ในกำลังใจและความช่วยเหลือต่างๆ ที่ได้รับอย่างเสมอมา
ขอขอบคุณในกำลังใจ ความช่วยเหลือ และความปรารถนาดีจากรุ่นพี่ เพื่อน รุ่นน้อง
ตลอดจนเจ้าหน้าที่ในภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารทุกท่าน

และสุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และพี่สาว สำหรับกำลังใจและความ
ช่วยเหลือในด้านต่างๆ อย่างเสมอมา ทำให้งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ท
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 กุ้งกุลาดำ.....	3
2.2 การเน่าเสียของสัตว์น้ำ.....	4
2.3 การถนอมอาหารโดยกระบวนการแช่เยือกแข็ง.....	8
2.4 การเตรียมการก่อนการแช่เยือกแข็ง.....	8
2.5 การแช่เยือกแข็ง.....	10
2.6 การเก็บรักษาในสภาพแช่เยือกแข็ง.....	17
2.7 การละลายผลิตภัณฑ์น้ำแข็ง.....	22
3. การทดลอง.....	27
3.1 การเตรียมวัตถุดิบ.....	27
3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	27
4. ผลการทดลองและวิจารณ์.....	34
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของกุ้งกุลาดำสด.....	34
4.2 สมบัติทางเคมีและกายภาพของกุ้งกุลาดำสด.....	35
4.3 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการแช่เยือกแข็งกุ้งกุลาดำ ด้วยวิธีแบบลมพ่น.....	36
4.4 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการแช่เยือกแข็งกุ้งกุลาดำ ด้วยวิธีแบบโครโอจีนิก.....	40

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5 การศึกษาผลของวิธีการละลายน้ำแข็ง และการแช่เยือกแข็ง- การละลายน้ำแข็งซ้ำต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมีและ กายภาพของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่น ตามภาวะที่คัดเลือกแล้วในข้อ 4.3 และแบบไมโครโอจินิคตามภาวะ ที่คัดเลือกแล้วในข้อ 4.4.....	44
5.สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	74
รายการอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก.....	81
ภาคผนวก ก.....	82
ภาคผนวก ข.....	94
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	104

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1	อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งจากวิธีการแช่เยือกแข็งที่ต่างกัน โดยใช้หลักการวัดความเร็วของการเกิดผิวน้ำแข็ง.....13
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของกึ่งกลาดำสด.....34
4.2	สมบัติทางเคมีและกายภาพของกึ่งกลาดำสด.....35
4.3	เวลาและอัตราเร็วที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งกึ่งกลาดำ ด้วยวิธีแบบลมพ่นที่ระดับความเร็วลมต่างๆ.....37
4.4	ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งของกึ่งกลาดำ ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นที่ระดับความเร็วลมต่างๆ.....38
4.5	ค่าแรงต้านทานการตัดขาดของกึ่งกลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง ด้วยวิธีแบบลมพ่นที่ระดับความเร็วลมต่างๆ เปรียบเทียบกับกึ่งกลาดำสด.....39
4.6	เวลาและอัตราเร็วที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งกึ่งกลาดำ ด้วยวิธีแบบโครโอจีนิกที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ.....41
4.7	ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งของกึ่งกลาดำ ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจีนิกที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ.....42
4.8	ค่าแรงต้านทานการตัดขาดของกึ่งกลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง ด้วยวิธีแบบโครโอจีนิกที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ เปรียบเทียบกับกึ่งกลาดำสด.....43
4.9	ค่า TBA ของกึ่งกลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่น ตามภาวะที่คัดเลือกแล้วที่วิธีละลายน้ำแข็งและจำนวนครั้งของ การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ.....45
4.10	ค่า TBA ของกึ่งกลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจีนิก ตามภาวะที่คัดเลือกแล้วที่วิธีละลายน้ำแข็งและจำนวนครั้งของ การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ.....45
4.11	ปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้ของกึ่งกลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง ด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วที่วิธีละลายน้ำแข็ง และจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ.....47

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.12 ปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้ของกึ่งกลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง ด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วที่วิธีละลายน้ำแข็ง และจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ.....	48
4.13 ค่าความเป็นกรด-ด่างของกึ่งกลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง ด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วที่วิธีละลายน้ำแข็ง และจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ.....	50
4.14 ค่าความเป็นกรด-ด่างของกึ่งกลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง ด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วที่วิธีละลายน้ำแข็ง และจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ.....	51
4.15 ค่าความเป็นกรด-ด่างของกึ่งกลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง ด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเมื่อพิจารณา เฉพาะอิทธิพลของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ.....	52
4.16 ค่าความเป็นกรด-ด่างของกึ่งกลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง ด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเมื่อพิจารณา เฉพาะอิทธิพลของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ.....	52
4.17 ปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือของกึ่งกลาดำที่ผ่าน การแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วที่วิธีละลาย น้ำแข็งและจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ.....	54
4.18 ปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือของกึ่งกลาดำที่ผ่าน การแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วที่วิธี ละลายน้ำแข็งและจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ.....	55
4.19 ปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือของกึ่งกลาดำที่ผ่าน การแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้ว เมื่อพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ.....	56
4.20 ปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือของกึ่งกลาดำที่ผ่าน การแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้ว เมื่อพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ.....	56

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
4.21	ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็งของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วที่วิธีละลายน้ำแข็งและจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ.....	58
4.22	ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็งของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วที่วิธีละลายน้ำแข็งและจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ.....	59
4.23	ค่าแรงต้านทานการตัดขาดของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วที่วิธีละลายน้ำแข็งและจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ.....	61
4.24	ค่าแรงต้านทานการตัดขาดของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วที่วิธีละลายน้ำแข็งและจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ.....	62
4.25	ค่าแรงต้านทานการตัดขาดของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเมื่อพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ.....	63
4.26	ค่าแรงต้านทานการตัดขาดของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเมื่อพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ.....	63
ข.1	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งกึ่งกูลาดำด้วยวิธีแบบลมพ่นที่ระดับความเร็วลมต่างๆ.....	94
ข.2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นที่ระดับความเร็วลมต่างๆ.....	94
ข.3	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าแรงต้านทานการตัดขาดของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นที่ระดับความเร็วลมต่างๆ.....	95

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ข.4	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็ง กึ่งอุตสาหกรรมด้วยวิธีแบบโครโอจินิคที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ.....95
ข.5	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการแช่เยือกแข็งของกึ่งอุตสาหกรรมที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง ด้วยวิธีแบบโครโอจินิคที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ.....96
ข.6	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าแรงต้านทานการตัดขาด ของกึ่งอุตสาหกรรมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิค ที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ.....96
ข.7	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่า TBA ของกึ่งอุตสาหกรรมที่ผ่านการ แช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเพื่อศึกษา ผลของวิธีละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ.....97
ข.8	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่า TBA ของกึ่งอุตสาหกรรมที่ผ่านการ แช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเพื่อศึกษา ผลของวิธีละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ.....97
ข.9	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้ ของกึ่งอุตสาหกรรมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่ คัดเลือกแล้วเพื่อศึกษาผลของวิธีละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง- การละลายน้ำแข็งซ้ำ.....98
ข.10	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้ ของกึ่งอุตสาหกรรมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่ คัดเลือกแล้วเพื่อศึกษาผลของวิธีละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง- การละลายน้ำแข็งซ้ำ.....98
ข.11	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าความเป็นกรด-ด่างของกึ่งอุตสาหกรรม ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเพื่อศึกษา ผลของวิธีละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ.....99

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ข.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าความเป็นกรด-ด่างของกึ่งกูลาดำ ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเพื่อศึกษาผลของวิธีละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ.....	99
ข.13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเพื่อศึกษาผลของวิธีละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ.....	100
ข.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเพื่อศึกษาผลของวิธีละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ.....	100
ข.15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็งของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเพื่อศึกษาผลของวิธีละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ.....	101
ข.16 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็งของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเพื่อศึกษาผลของวิธีละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ.....	102
ข.17 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าแรงต้านทานการตัดขาดของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเพื่อศึกษาผลของวิธีละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ.....	103
ข.18 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าแรงต้านทานการตัดขาดของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเพื่อศึกษาผลของวิธีละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ.....	103

สารบัญรูป

รูปประกอบ	หน้า
2.1 ลักษณะและส่วนต่างๆ ของกุ้ง.....	4
2.2 สาเหตุของการเน่าเสียของสัตว์น้ำ.....	5
2.3 แผนภาพการแช่เยือกแข็งของอาหารและสารชีววิทยา ที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วที่ต่างกัน.....	10
2.4 การเกิดผลึกน้ำแข็งในเซลล์เนื้อเยื่อเมื่ออัตราเร็ว ในการแช่เยือกแข็งเป็นแบบช้า.....	14
2.5 การเกิดผลึกน้ำแข็งในเซลล์เนื้อเยื่อเมื่ออัตราเร็ว ในการแช่เยือกแข็งเป็นแบบเร็ว.....	14
2.6 การตกผลึกใหม่แบบไมเกรทอรี (migratory recrystallization).....	18
2.7 ปฏิกริยาของสาร TBA กับ malonaldehyde.....	20
2.8 ปัจจัยทางเคมีและกายภาพต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรตีน.....	21
3.1 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมพ่น (air blast freezer) ที่ใช้ในงานวิจัย.....	29
3.2 ทิศทางการเคลื่อนที่ของลมเย็นในเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมพ่น.....	30
3.3 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบไนโตรเจนเหลวที่ใช้ในงานวิจัย (Cryo-Test Chamber Nitrogen Freezer).....	31
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไประหว่าง การแช่เยือกแข็งกุ้งกุลาดำด้วยวิธีแบบลมพ่นที่ระดับความเร็วลมต่างๆ.....	36
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไประหว่าง การแช่เยือกแข็งกุ้งกุลาดำด้วยวิธีแบบไนโตรเจนเหลวที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ.....	40
4.3 ลักษณะทางเนื้อเยื่อของกุ้งกุลาดำสดเมื่อตัดลำตัวตามขวางและ focus บริเวณ inner part.....	65
4.4 ลักษณะทางเนื้อเยื่อของกุ้งกุลาดำสดเมื่อตัดลำตัวตามขวางและ focus บริเวณรอบๆ subcuticular membrane.....	65
4.5 ลักษณะทางเนื้อเยื่อของกุ้งกุลาดำที่ละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟและ จำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ เมื่อตัดลำตัวตามขวางและ focus บริเวณ inner part.....	66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปประกอบ	หน้า
4.6	ลักษณะทางเนื้อเยื่อของกิ่งกุลาดำที่ละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟและจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ เมื่อตัดลำตัวตามขวางและ focus บริเวณรอบๆ subcuticular membrane.....67
4.7	ลักษณะทางเนื้อเยื่อของกิ่งกุลาดำที่ละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิตู้เย็นและจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ เมื่อตัดลำตัวตามขวางและ focus บริเวณ inner part.....68
4.8	ลักษณะทางเนื้อเยื่อของกิ่งกุลาดำที่ละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิตู้เย็นและจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ เมื่อตัดลำตัวตามขวางและ focus บริเวณรอบๆ subcuticular membrane.....69
4.9	ลักษณะทางเนื้อเยื่อของกิ่งกุลาดำสดโดยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเมื่อตัดลำตัวตามขวาง.....72
4.10	ลักษณะทางเนื้อเยื่อของกิ่งกุลาดำที่ผ่านการละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟและผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ 2 ครั้ง (freeze-thaw cycle ที่ 2) โดยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเมื่อตัดลำตัวตามขวาง.....72
4.11	ลักษณะทางเนื้อเยื่อของกิ่งกุลาดำที่ผ่านการละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟและผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ 4 ครั้ง (freeze-thaw cycle ที่ 4) โดยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเมื่อตัดลำตัวตามขวาง.....73

บทที่ 1

บทนำ

กัญกุลาดำเป็นสินค้าเกษตรส่งออกที่สำคัญของไทย สามารถทำรายได้ที่เป็นเงินตราต่างประเทศปีละหลายหมื่นล้านบาท ในปี 2539 ประเทศไทยมีผลผลิตกัญกุลาดำทั้งจากการจับจากธรรมชาติและการเพาะเลี้ยง 236,055 ตัน ปริมาณการส่งออก 161,461 ตัน คิดเป็นมูลค่าการส่งออกกึ่งสดแช่เย็นแช่แข็ง 43,402 ล้านบาท ในปี 2540 มีผลผลิตกัญกุลาดำ 220,950 ตัน ปริมาณการส่งออก 137,081 ตัน คิดเป็นมูลค่าการส่งออก 47,184 ล้านบาท (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2542) ส่วนในปี 2541 พบว่าผลผลิตกัญกุลาดำในครึ่งปีแรกลดลงเนื่องจากปรากฏการณ์เอลนีโญ อีกทั้งปริมาณแม่พันธุ์กัญที่จับจากทะเลลดลง ส่งผลให้ราคากัญมีแนวโน้มสูงขึ้นต่อเนื่องจากปี 2540 ซึ่งเป็นสิ่งจูงใจให้เกษตรกรรายใหม่หันมาเลี้ยงกัญกันมากขึ้น ดังนั้นในครึ่งหลังของปี 2541 ปริมาณผลผลิตกึ่งสดแช่เย็นแช่แข็งออกสู่ตลาดมากขึ้น ตลอดทั้งปี 2541 ประเทศไทยมีผลผลิตกัญกุลาดำ 240,900 ตัน ปริมาณการส่งออก 156,175 ตัน มีมูลค่าการส่งออก 58,343 ล้านบาท (กรมเศรษฐกิจการพาณิชย์, 2542)

เนื่องจากในช่วงปลายปี 2540 และต้นปี 2541 เกษตรกรหันมาเพาะเลี้ยงกัญกุลาดำเพิ่มมากขึ้น และปริมาณการส่งออกกัญกุลาดำก็เพิ่มมากขึ้นด้วย ถือได้ว่าประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกอันดับหนึ่งของโลก ตลาดส่งออกที่สำคัญของไทยได้แก่ ญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา สิงคโปร์ จีน ไต้หวันและฮ่องกง โดยมีประเทศที่เป็นคู่แข่งสำคัญ ได้แก่ เอกวาดอร์ อินโดนีเซีย เม็กซิโก และเวียดนาม (สำนักงานเลขาธิการวุฒิสภา, 2541)

ในช่วงปี 2541-2543 ประเทศไทยส่งออกผลิตภัณฑ์กึ่งสดแช่เย็นแช่แข็งในแต่ละปีมีมูลค่า 58,340 48,348 และ 60,270 ล้านบาท ตามลำดับ และในปี 2544 (มกราคม-พฤศจิกายน) มีมูลค่าการส่งออกสูงถึง 90,450 ล้านบาท คิดเป็นอัตราการขยายตัวร้อยละ 67.1 โดยตลาดส่งออกที่สำคัญเป็นอันดับหนึ่ง คือประเทศสหรัฐอเมริกา รองลงมาได้แก่ ญี่ปุ่น สิงคโปร์ แคนาดา และออสเตรเลีย (กรมเศรษฐกิจการพาณิชย์, 2545)

เป็นที่ทราบกันว่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์กึ่งสดแช่เยือกแข็งนอกจากจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของกึ่งสดแล้ว ยังขึ้นอยู่กับกระบวนการที่ดีในขั้นตอนของกระบวนการแช่เยือกแข็งอีกด้วย อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งตลอดจนขั้นตอนในการละลายน้ำแข็งมีผลให้เกิดการสูญเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไปกับน้ำที่ไหลออกมาออกเซลล์ (drip) (สายสนม ประดิษฐ์ดวง, 2539) การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งอาจเกิดขึ้นซ้ำกันหลายครั้ง (freeze-thaw cycles) ได้ในระหว่างการขนส่ง ในตู้แช่แข็งตามร้านค้าปลีก ร้านอาหาร ในครัวเรือน หรือแม้แต่โรงงานที่รับวัตถุดิบใน

รูปผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งมาแล้ว ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์กึ่งแช่เยือกแข็งในด้านต่างๆ เช่น ลักษณะเนื้อสัมผัส กลิ่นรส เป็นต้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของการแช่เยือกแข็งกุกูลาดำด้วยวิธีแบบลมพ่น และแบบโครโอจีนิก ตลอดจนผลของวิธีการละลายน้ำแข็ง และการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านเคมีและกายภาพ ซึ่งจะทำให้ทราบถึงประโยชน์และข้อเสียเปรียบของกระบวนการแช่เยือกแข็ง และใช้เป็นแนวทางเพื่อควบคุมและรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์กุกูลาดำแช่เยือกแข็งให้มีคุณภาพดีตลอดขั้นตอนของกระบวนการแช่เยือกแข็ง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

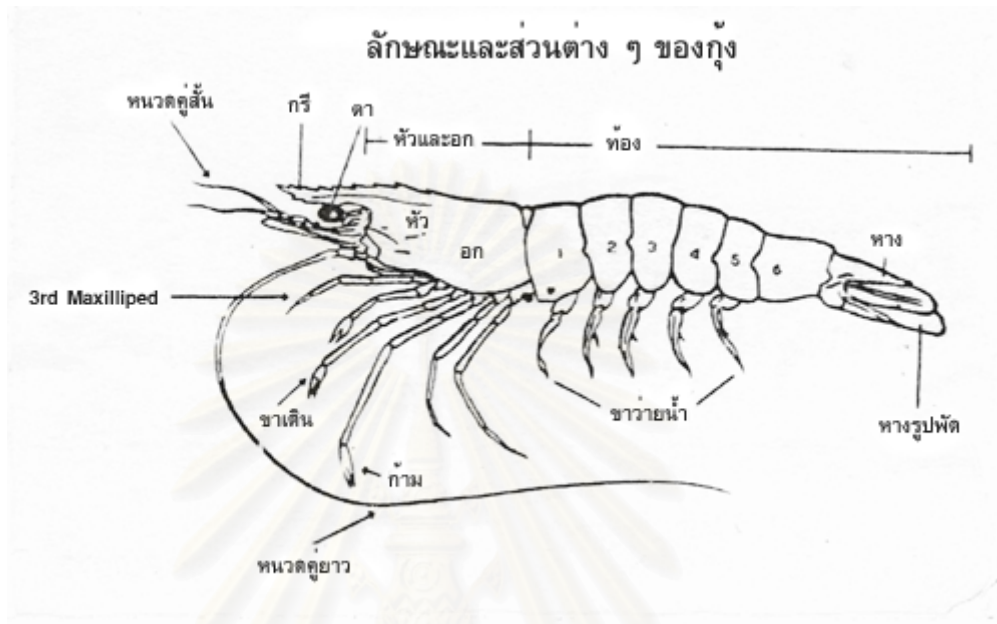
2.1 กุ้งกุลาดำ

กุ้งกุลาดำ หรือ กุ้งทะเล หรือ กุ้งม้าลาย (*Penaeus monodon*) มีชื่อภาษาอังกฤษว่า Black shrimp หรือ Tiger shrimp หรือ Giant tiger shrimp เป็นกุ้งทะเลที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในตระกูล Penaeidae แหล่งกำเนิดดั้งเดิมอยู่ในทะเลแถบอินโดแปซิฟิกตะวันตก แอฟริกา ตะวันออกและตะวันตกเฉียงใต้ และคาบสมุทรอินเดีย เมื่อวัยอ่อน (Juveniles) จะอาศัยตามปากแม่น้ำ และเมื่อเติบโต (adults) จะชอบอาศัยในทะเลที่มีพื้นเป็นโคลนปนทราย ระดับความลึกไม่เกิน 110 เมตร กุ้งกุลาดำชอบฝังตัวในเวลากลางวันและออกหากินในเวลากลางคืน วางไข่ได้ตลอดทั้งปี แต่วางไข่ชุกชุมระหว่างเดือนพฤษภาคม-ธันวาคม ในแถบน้ำกร่อย กินอาหารได้ทั้งพืชและสัตว์ มีความแข็งแรงและทนทานมาก (พรธนิภา หาญวิวัฒน์กิจ, 2531)

ลักษณะภายนอกของกุ้งกุลาดำ เป็นสัตว์น้ำที่ไม่มีกระดูกสันหลัง ลำตัวยาว มีเปลือกหุ้มลำตัวและแบ่งเป็นปล้องๆ เปลือกเกลี้ยง ไม่มีขน มีหนวดสีดำ มีพินกรีด้านบน 7-8 คู่ ด้านล่าง 3 คู่ ช่องข้างกรีทั้งสองด้านแคบและยาวไม่ถึงพินกรีที่สุดท้าย ลำตัวสีน้ำตาลปนเขียว มีแถบสีน้ำตาลหรือดำพาดขวางลำตัวตามปล้องและปลายหาง โคนขาว่ายน้ำมีสีเหลืองพาดขวางเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เป็นกุ้งน้ำเค็มและสามารถเลี้ยงได้ในน้ำจืด จัดเป็นกุ้งที่มีความสำคัญทางการค้ามากที่สุด เป็นผลิตภัณฑ์การเกษตรที่มีศักยภาพทั้งด้านการผลิตและการตลาดสูงเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์การเกษตรอื่นๆ เช่น ข้าว มันสำปะหลัง และยางพารา เป็นต้น ราคาตลาดดีเหมาะต่อการเลี้ยงมาก แต่ข้อเสียคือหาพันธุ์ได้ยาก (สำนักบริหารธนาคารกสิกรไทย, 2521; วัลลภ คงเพิ่มพูน, 2532; ทวี จินตธรรม, 2538)

อนุตรา อัครจามร (2534) ได้ศึกษาลักษณะทางเนื้อเยื่อของกุ้งกุลาดำโดยได้อธิบายลักษณะทางเนื้อเยื่อไว้ 9 ระบบ ได้แก่ ระบบห่อหุ้มร่างกาย ระบบกล้ามเนื้อ ระบบหมุนเวียนของเลือด ระบบหายใจ ระบบย่อยอาหาร ระบบขับถ่าย ระบบประสาทและอวัยวะรับความรู้สึก ระบบต่อมไร้ท่อ และระบบสืบพันธุ์ พบว่าระบบห่อหุ้มร่างกายจะมีเปลือกเป็นเครื่องห่อหุ้มร่างกายทั้งหมด ประกอบด้วยชั้น epicuticle exocuticle endocuticle และ membranous layer ใต้ลงไปเป็นชั้น epidermis ประกอบด้วยเซลล์รูปร่างสี่เหลี่ยมที่เรียงตัวกันชั้นเดียว และ tegmental gland ซึ่งจะพบอยู่ใต้ชั้น epidermis ประกอบด้วยเซลล์ขนาดใหญ่เรียงตัวกันเป็นวงคล้ายกลีบดอกไม้ ส่วนระบบกล้ามเนื้อ พบกล้ามเนื้อเพียงชนิดเดียว คือ กล้ามเนื้อลาย ซึ่งจะ

เห็นลายเป็นแถบทึบ (A-band) สลับกับแถบใส (I-band) และ Z-line อยู่กลางแถบใส พบทั่วไปตามลำตัว รอบอวัยวะต่างๆ ผนังเส้นเลือดและในหัวใจ ลักษณะของ muscle fiber มี 2 แบบคือ tonic fiber และ phasic fiber

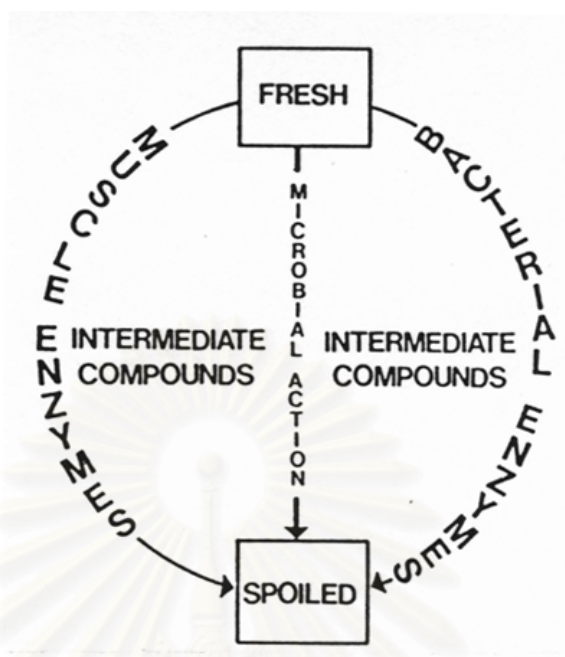


รูปที่ 2.1 ลักษณะและส่วนต่างๆ ของกุ้ง

ที่มา : สำนักบริหารธนาคารกสิกรไทย (2521)

2.2 การเน่าเสียของสัตว์น้ำ

สัตว์น้ำต่างๆ เป็นแหล่งอาหารโปรตีนที่สำคัญของคนและสัตว์ ผลผลิตจากสัตว์น้ำของไทยได้จากแหล่งน้ำตามธรรมชาติ เช่น แม่น้ำ คลอง และท้องทะเลทั่วอ่าวไทยและทะเลอันดามัน นอกจากนั้นมีการขุดบ่อหรือสระเพื่อใช้ในการเพาะเลี้ยง ซึ่งนิยมทำในบริเวณใกล้กับแหล่งน้ำตามธรรมชาติ (วรรณวิบูลย์ กาญจนกฤษร, 2539) การเน่าเสียของสัตว์น้ำจะเกิดขึ้นทันทีหลังจากสัตว์น้ำตาย และขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องตั้งแต่ก่อนสัตว์น้ำตายซึ่งจะเกิดขึ้นเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับวิธีการจับและแหล่งจับสัตว์น้ำ สัตว์น้ำซึ่งจับตามริมชายฝั่งจะมีจำนวนจุลินทรีย์มากกว่าสัตว์น้ำที่ได้จากทะเลลึกหรือจากแหล่งน้ำสะอาด การเน่าเสียของสัตว์น้ำเกิดจากสาเหตุหลักที่สำคัญ 2 ประการคือ จากปฏิกิริยาของเอนไซม์ในตัวของสัตว์น้ำเอง และจากปฏิกิริยาของเอนไซม์จากแบคทีเรียที่ติดอยู่ในตัวสัตว์น้ำ แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สาเหตุของการเน่าเสียของสัตว์น้ำ

ที่มา : Pedraja (1970)

2.2.1 การเน่าเสียที่เกิดจากปฏิกิริยาของเอนไซม์ในตัวของสัตว์น้ำเอง

สัตว์น้ำที่ยังมีชีวิตจะมีการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีอยู่ตลอดเวลา เช่น กระบวนการสร้างและสลาย (metabolism) การปรับสภาพความเข้มข้นของสารละลายในเนื้อเยื่อให้เหมาะสมกับความเข้มข้นของน้ำทะเล (osmoregulation) ซึ่งเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารประกอบบางชนิด เช่น ยูเรีย ไกลซีน เป็นต้น แต่สัตว์น้ำที่ตายจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีอีกลักษณะหนึ่งโดยหลังจากที่สัตว์น้ำตายการขนส่งออกซิเจนจะหยุดชะงัก ทำให้เนื้อเยื่อขาดออกซิเจนแต่เซลล์เนื้อเยื่อยังต้องการพลังงานเพื่อใช้ในการยึดหดตัว ซึ่งพลังงานนี้สะสมอยู่ในรูปของ ATP (adenosine triphosphate) ซึ่งเป็นสารประกอบประเภท polyphosphate ดังนั้น ATP จะถูกใช้ไปโดยเกิดกระบวนการ ATP hydrolysis และมีการสร้าง ATP ใหม่ขึ้นมาสดเชย จึงทำให้ปริมาณ ATP ในเนื้อเยื่อมีปริมาณคงที่อยู่ชั่วเวลาหนึ่ง ระยะเวลาที่ระดับ ATP คงที่ในเนื้อเยื่อนี้กล้ามเนื้อจะยังไม่เกิดการเกร็งตัวจึงเรียกว่าระยะก่อนการเกร็งตัว (pre-rigor mortis stage) การขาดออกซิเจนในเนื้อเยื่อทำให้เกิดการสร้าง ATP จากกลูโคสแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งเป็นผลให้ระดับความเป็นกรด-ด่างของเนื้อเยื่อลดต่ำลงเนื่องจากมีกรดแลคติกเกิดขึ้น

เมื่อเข้าสู่ระยะการเกร็งตัว (rigor mortis stage) กล้ามเนื้อจะมีลักษณะเกร็งและหดตัวเกิดขึ้นเนื่องจากโปรตีนที่ประกอบอยู่ในเส้นใยเนื้อคือ actin จะรวมตัวกับ myosin ได้ actomyosin ซึ่งไม่ละลายน้ำ การรวมตัวนี้อาศัยพลังงานจาก ATP ด้วยเหตุที่ปริมาณ ATP ในเนื้อเยื่อเริ่มลดต่ำลงจึงทำให้เกิดการรวมตัวกันอย่างถาวรของ actomyosin เพิ่มมากขึ้นเป็นลำดับเป็นผลให้กล้ามเนื้อเริ่มเกิดการเกร็งแข็งและสูญเสียความสามารถในการยืดตัว (extensibility) ซึ่งความสามารถในการยืดตัวนี้มีมากที่สุดในช่วง pre-rigor ในระยะการเกร็งตัวของกล้ามเนื้อ น้ำย่อยจากสัตว์น้ำและแบคทีเรียจะเข้าทำลายเนื้อเยื่อได้ยาก ดังนั้นถ้าสามารถยืดระยะเวลาให้นานขึ้นจะทำให้รักษาคุณภาพของสัตว์น้ำไว้ได้นาน เมื่อสิ้นสุดระยะการเกร็งตัวของกล้ามเนื้อ กล้ามเนื้อจะค่อยๆอ่อนตัวลง จากนั้นจะมีการย่อยสลายเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของเอนไซม์ที่มีอยู่ในตัวสัตว์น้ำเอง ได้แก่การย่อยสลาย ATP ให้เกิดเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็กๆ มากมาย ทำให้เกิดสี กลิ่นรส แตกต่างกันไป (ปรียา วิบูลย์เศรษฐ์, 2538; วรณวิบูลย์ กาญจนกฤษ, 2539)

2.2.2 การเน่าเสียที่เกิดจากปฏิกิริยาของเอนไซม์จากแบคทีเรียที่ติดอยู่ในตัวสัตว์น้ำ

หลังจากที่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของเอนไซม์ที่มีอยู่ในตัวสัตว์น้ำแล้ว เอนไซม์จากแบคทีเรียจะทำหน้าที่ย่อยสลายสารต่างๆ ของสัตว์น้ำ ทำให้สัตว์น้ำมีกลิ่นเหม็นและเน่าเสีย การเน่าเสียของสัตว์น้ำเกิดจากแบคทีเรียย่อยสลายสารต่างๆ ดังต่อไปนี้ (ปรียา วิบูลย์เศรษฐ์, 2538)

1. Trimethylamine oxide (TMAO) เป็นสารประกอบที่พบมากในสัตว์ทะเล แบคทีเรียจะใช้เอนไซม์ย่อยสลาย TMAO ให้เปลี่ยนเป็น trimethylamine (TMA) เนื่องจากสัตว์น้ำที่เน่าเสียจะมีการสะสมของ TMA ไว้มาก จึงมักใช้ปริมาณ TMA เป็นดัชนีชี้การเน่าเสียของสัตว์น้ำ แต่อย่างไรก็ตามมีสัตว์น้ำบางชนิดในขณะที่มีการเน่าเสียเกิดขึ้นนั้นยังคงมีปริมาณ TMA เพียงเล็กน้อยเท่านั้น และสัตว์น้ำบางชนิดมีปริมาณ TMA มากแต่ยังคงนำไปบริโภคได้ ในขณะที่แบคทีเรียย่อย TMAO ให้เป็น TMA และ dimethylamine (DMA) นั้นแบคทีเรียจะเพิ่มจำนวนขึ้นเรื่อยๆ การวัดการเน่าเสียของสัตว์น้ำนอกจากจะดูจากปริมาณ TMA ที่เกิดขึ้นแล้วการตรวจสอบปริมาณ total volatile base (TVB) ก็ใช้เป็นดัชนีบอกการเน่าเสียได้เช่นกัน สาร TMA และแอมโมเนียมักเรียกรวมกันว่า TVB สัตว์น้ำที่มีปริมาณ TVB มากมักจะมีจำนวนแบคทีเรียมากตามไปด้วย

2. โปรตีน ในช่วงแรกโปรตีนสลายตัวให้กรดอะมิโนหลายชนิดและกรดอะมิโนจะถูกย่อยต่อให้สารประเภท keto acid และ amine

3. กรดอะมิโนที่มีซัลเฟอร์รวมอยู่ด้วย เช่น cysteine cystine และ methionine เมื่อถูกย่อยด้วยเอนไซม์จากแบคทีเรียจะสลายให้สารที่มีกลิ่นซัลเฟอร์ เช่น hydrogen sulfide dimethylsulfide และ methyl mercaptan

4. ไนโตรเจน เอนไซม์ไลเปสจะย่อยไขมันไม่อิ่มตัวให้เปลี่ยนเป็นสาร carboxyl ซึ่งเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและมีกลิ่นไม่ดี

การเปลี่ยนแปลงในระยะแรกนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิทั้งสิ้น ดังนั้นการลดการเปลี่ยนแปลงเพื่อชะลอการเสื่อมเสียของสัตว์น้ำจึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเก็บรักษาหลังจากจับสัตว์น้ำขึ้นมาจากแหล่งน้ำ ดังนั้นเมื่อจับสัตว์น้ำแล้วควรเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่ำ เช่น ดองในน้ำแข็ง หรือเก็บในห้องเย็น (มยุรี จัยวัฒน์, 2527)

สัตว์น้ำที่สดจะมีรสดี ไม่มีกลิ่นคาวและกลิ่นเหม็น การบริโภคสัตว์น้ำที่จับขึ้นมาจากแหล่งน้ำใหม่ๆ ให้คุณภาพความสดดีที่สุดในแต่เนื่องจากการจับในปริมาณมากและผู้ซื้ออยู่ในท้องถิ่นที่ไกลออกไป จึงจำเป็นต้องมีวิธีการรักษาความสดของสัตว์น้ำให้คงอยู่นานที่สุด ปัจจัยที่สำคัญในการรักษาความสดของสัตว์น้ำคือ (วรรณวิบูลย์ กาญจนบุญชร, 2539)

1. อุณหภูมิภายในตัวของสัตว์น้ำ ควรลดอุณหภูมิภายในเนื้อเยื่อสัตว์น้ำให้ต่ำเนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำปฏิกิริยาของเอนไซม์และปฏิกิริยาเคมีต่างๆ จะเกิดได้ช้า การเจริญของจุลินทรีย์ที่มีอัตราการลดลงจึงช่วยรักษาคุณภาพของเนื้อสัตว์น้ำให้คงความสดอยู่ได้นาน

2. การรักษาความสะอาด จุลินทรีย์เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้สัตว์น้ำเน่าเสีย การระวังรักษาความสะอาดเครื่องมือเครื่องใช้ รวมทั้งน้ำใช้ที่เกี่ยวข้องสัมผัสกับสัตว์น้ำจะช่วยลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ที่จะเข้าสู่สัตว์น้ำ

3. แรงกระแทกหรือแรงกดอัดบนตัวสัตว์น้ำ สัตว์น้ำที่กองทับถมกันหลายๆพวกที่อยู่ด้านล่างจะช้า เนื้อเยื่อฉีกขาด ท้องแตก เป็นต้น ซึ่งบริเวณเหล่านี้ทำให้เกิดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์เข้าสู่เนื้อเยื่อ ทำให้สัตว์น้ำเสื่อมเสียได้เร็วขึ้น ดังนั้นในการปฏิบัติต่อสัตว์น้ำควรให้ความระมัดระวังเป็นพิเศษเพื่อหลีกเลี่ยงการชอกช้ำ ฉีกขาดของเนื้อเยื่อ

การที่จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีนั้นจะต้องเริ่มปฏิบัติอย่างถูกต้อง ตั้งแต่จับสัตว์น้ำขึ้นจากแหล่งน้ำเรื่อยไปจนกระทั่งนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จ การแปรรูปใดๆ ที่เริ่มจากวัตถุดิบที่ด้อยคุณภาพย่อมจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์สำเร็จที่ด้อยคุณภาพเช่นกัน

กุ้งจัดเป็นสัตว์น้ำที่เสื่อมเสียคุณภาพได้ง่ายหลังจากถูกจับขึ้นมาจากแหล่งน้ำเมื่ออยู่ในน้ำทะเล ความเข้มข้นของสารที่อยู่ในตัวกุ้ง (body fluid) จะใกล้เคียงกับความเข้มข้นของน้ำทะเล สารที่อยู่ในตัวกุ้งเหล่านี้ประกอบด้วย น้ำตาล น้ำตาลฟอสเฟต โปรตีนที่ละลายได้ และกรดอะมิโนอิสระ กุ้งจะมีแหล่งสะสมกรดอะมิโนอิสระภายในเซลล์ และมีปริมาณแตกต่างกันไปตามแหล่งน้ำที่มีความเค็มต่างกัน (Pedraja, 1970)

ดังนั้นเพื่อเป็นการชะลอการเสื่อมเสียที่อาจจะเกิดขึ้น จึงมีการถนอมอาหารโดยกระบวนการแช่เยือกแข็งซึ่งได้รับความนิยมอย่างมาก นอกจากนี้จะช่วยชะลอการเสื่อมเสียแล้วยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์และเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญนำรายได้เข้าสู่ประเทศเป็นจำนวนมาก

2.3 การถนอมอาหารโดยกระบวนการแช่เยือกแข็ง

การถนอมอาหารโดยการแช่เยือกแข็งเป็นวิธีที่ชาวโลกแถบขั้วโลกเหนือและใต้รู้จักกันมานานแล้วโดยเก็บรักษาอาหารไว้ในหิมะ ซึ่งจัดเป็นวิธีการแช่เยือกแข็งตามธรรมชาติ การแช่เยือกแข็งอาหารเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถเก็บรักษาอาหารไว้ได้นาน หากมีการดำเนินการอย่างถูกต้องเหมาะสมจะช่วยรักษาคุณภาพทั้งในรูปกลิ่นรส สี ไข่ได้สูงมากเมื่อเทียบกับวิธีถนอมอาหารอื่นๆ แต่จะสามารถรักษาลักษณะเนื้อสัมผัสไว้ได้ปานกลางเท่านั้น แม้ว่าการแช่เยือกแข็งจะเป็นวิธีที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีถนอมอาหารอื่นๆ ก็ตาม แต่ก็ยังมีผลในการทำลายผลิตภัณฑ์ที่นำไปแช่เยือกแข็งได้ ความรุนแรงของการทำลายนั้นขึ้นกับลักษณะของกระบวนการแช่เยือกแข็งและของผลิตภัณฑ์ (ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาลิก, 2532; สายสนม ประดิษฐ์ดวง, 2539)

กระบวนการแช่เยือกแข็ง ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่ การเตรียมการก่อนการแช่เยือกแข็ง การแช่เยือกแข็ง การเก็บรักษาในสภาพแช่เยือกแข็ง และการละลายผลิตภัณฑ์น้ำแข็ง (Karel et al., 1975)

2.4 การเตรียมการก่อนการแช่เยือกแข็ง

การเตรียมการก่อนนำผลิตภัณฑ์ไปแช่เยือกแข็งจะต้องกระทำอย่างถูกต้องเพราะมีความสำคัญที่เกี่ยวพันไปถึงคุณภาพของอาหารที่แช่เยือกแข็ง สำหรับการเตรียมจะแตกต่างกันไปตามชนิดของวัตถุดิบที่นำมาแช่เยือกแข็ง และคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็งขึ้นอยู่กับคุณภาพของวัตถุดิบ (สายสนม ประดิษฐ์ดวง, 2539)

การเตรียมกึ่งกุลาดำก่อนที่จะนำไปแช่เยือกแข็งนั้น ได้แก่ ขั้นตอนการคัดขนาด การล้างทำความสะอาด การตัดแต่ง เป็นต้น (Chandrasekaran, 1994)

การตัดแต่งกึ่งกุลาดำก่อนนำไปแช่เยือกแข็งสามารถทำได้หลายแบบ ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกึ่งเยือกแข็ง มอก.115-2529 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2529) แบ่งการตัดแต่งกึ่งออกเป็น 6 ชนิด คือ

1. กุ้งทั้งตัว (whole) ได้แก่ กุ้งที่มีหัว (cephalothorax) ลำตัว และหางครบ ไม่เอาเปลือกออก
2. กุ้งเด็ดหัว (headless) ได้แก่ กุ้งตามข้อ 1 ที่เอาหัวออก
3. กุ้งเนื้อไว้หาง (peeled tail on) ได้แก่ กุ้งที่เอาหัวและเปลือกออกแล้ว แต่ยังคงเหลือเปลือกปล้องสุดท้ายที่ติดกับหางและหางอยู่ แบ่งออกเป็น 4 แบบ คือ
 - 3.1 แบบเต็มตัว (round)
 - 3.2 แบบเต็มตัวซีกได้ (round and deveined) ได้แก่ กุ้งตามข้อ 3.1 ที่เอาไส้ออก
 - 3.3 แบบผีเสื้อ (split or cutlet) ได้แก่ กุ้งตามข้อ 3.2 ที่ผ่าหลังลึกเกินครึ่งหนึ่งของความหนาของตัว แล้วแผ่ออกเป็นปีกผีเสื้อ
 - 3.4 แบบผ่าหลัง (western style) ได้แก่ กุ้งตามข้อ 3.2 ที่ผ่าหลังลึกผ่านแถบกลางลำตัวให้ขาดจากกันนับจากปล้องที่ 1 ทางหัวถึงปล้องที่ 4
4. กุ้งเนื้อไม่ไว้หาง (peeled tail off) ได้แก่ กุ้งที่เอาหัว หาง และเปลือกออกทั้งหมด แบ่งออกเป็น 4 แบบ คือ
 - 4.1 แบบเต็มตัว (peeled)
 - 4.2 แบบเต็มตัวซีกได้ (peeled and deveined) ได้แก่ กุ้งตามข้อ 4.1 ที่เอาไส้ออก
 - 4.3 แบบผีเสื้อ (split or cutlet) ได้แก่ กุ้งตามข้อ 4.2 ที่ผ่าหลังลึกเกินครึ่งหนึ่งของความหนาของตัว แล้วแผ่ออกเป็นปีกผีเสื้อ
 - 4.4 แบบผ่าหลัง (western style) ได้แก่ กุ้งตามข้อ 4.2 ที่ผ่าหลังลึกผ่านแถบกลางลำตัวให้ขาดจากกันนับจากปล้องที่ 1 ทางหัวถึงปล้องที่ 4
5. กุ้งชิ้น (pieces) ได้แก่ กุ้งที่มีปล้องเหลือน้อยกว่า 5 ปล้อง สำหรับกุ้งขนาดเท่ากับหรือน้อยกว่า 150 ตัวต่อกิโลกรัม หรือกุ้งที่มีปล้องเหลือน้อยกว่า 4 ปล้อง สำหรับกุ้งขนาดมากกว่า 150 ตัวต่อกิโลกรัม
6. กุ้งชนิดอื่นๆ ได้แก่ กุ้งที่แตกต่างจากข้อ 1 ถึงข้อ 5 และต้องระบุชนิดหรือแบบบนฉลากอย่างชัดเจน เพื่อหลีกเลี่ยงการเข้าใจผิดที่จะมีขึ้นต่อผู้บริโภค

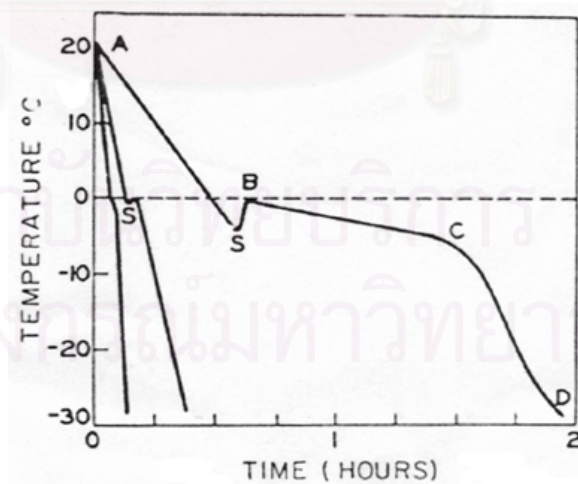
2.5 การแช่เยือกแข็ง

หลักพื้นฐานในการแช่เยือกแข็งคือ การลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำลงจนถึงระดับที่สิ่งมีชีวิตไม่สามารถจะดำเนินปฏิกิริยาทางชีวเคมีต่อไปได้ โดยทั่วไปมักจะเป็นที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสหรือต่ำกว่า ซึ่งหลักสำคัญคือ การเปลี่ยนสถานะของน้ำในอาหารที่เป็นของเหลวให้เป็นน้ำแข็ง เพื่อมิให้น้ำนั้นสามารถทำหน้าที่ต่างๆ ในปฏิกิริยาเคมี และไม่เป็นสับสเตรทให้กับเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนมากับอาหารได้ (สายสนม ประดิษฐดวง, 2539)

การแช่เยือกแข็งจะเป็นผลให้เกิดผลึกน้ำแข็งขึ้นภายในอาหาร ขนาดหรือการเปลี่ยนแปลงขนาดของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นนี้จะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็ง เมื่อนำผลิตภัณฑ์ไปละลายน้ำแข็งออก การเพิ่มขนาดของผลึกมักจะเกิดขึ้นในระหว่าง 1 เดือนแรกของการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในสภาพแช่เยือกแข็ง ถ้าผลึกน้ำแข็งเริ่มต้นมีขนาดเล็กก็จะมีโอกาสในการขยายขนาดของผลึกน้ำแข็งได้น้อยกว่าผลึกน้ำแข็งเริ่มต้นที่มีขนาดใหญ่ (Boast, 1985)

โดยทั่วไปภายในเซลล์ของอาหารตามธรรมชาติมักจะเป็นสารละลายเนื้อเดียวกันที่ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิดด้วยกัน โดยจะแตกต่างกันไปในแต่ละชนิดของอาหาร ดังนั้นแผนภาพการแช่เยือกแข็งของสารแต่ละอย่างจะมีลักษณะเฉพาะตัว แผนภาพการแช่เยือกแข็งของอาหารซึ่งเป็นผลจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสิ่งที่นำมาแช่เยือกแข็งที่เปลี่ยนแปลงไปในระยะเวลาของการแช่เยือกแข็งหรือการดึงความร้อนออกแสดงดังรูปที่ 2.3

(Karel et al., 1975)



รูปที่ 2.3 แผนภาพการแช่เยือกแข็งของอาหารและสารชีววิทยาที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วที่ต่างกัน

ที่มา: Karel et al. (1975)

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งแบบช้าปานกลางนั้นเหมาะสมสำหรับการประมาณสภาวะของ solid-liquid equilibrium ในขณะที่อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งแบบเร็วจะให้ข้อมูลของเวลาและอุณหภูมิในสภาวะที่ไม่สมดุล (non-equilibrium) ถ้าเป็นการแช่เยือกแข็งแบบช้าพบว่า อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะลดลงโดยในช่วง AS ผลิตภัณฑ์จะมีการระบายความร้อนสัมผัสผิวด้านนอก (sensible heat) ทำให้น้ำในอาหารมีอุณหภูมิลดต่ำลงโดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำไปเป็นน้ำแข็ง จุด S เป็นจุดความเย็นยวดยิ่ง (supercooling) คือจุดที่สารละลายในผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งแต่ยังไม่เกิดผลึกขึ้น จุดเย็นตัวยวดยิ่งนี้ไม่จำเป็นต้องพบเสมอไป ขึ้นกับความไวของการตอบสนองต่อเวลา และตำแหน่งที่เครื่องวัดอุณหภูมิแตะอยู่กับตัวอย่าง หลังจากผ่านจุดเย็นตัวยวดยิ่งไปแล้ว จะเริ่มก่อเกิดนิวเคลียสผลึกขึ้นตามด้วยการขยายขนาดของผลึกน้ำแข็ง ทำให้เกิดการปลดปล่อยความร้อนเนื่องจากการเกิดผลึกน้ำแข็ง อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จึงสูงขึ้น และเกิดจุดเยือกแข็งเริ่มต้นปรากฏของตัวอย่างที่จุด B ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดของอาหาร ช่วง BC เป็นช่วงเวลาที่น้ำส่วนใหญ่ในผลิตภัณฑ์ (ประมาณ 3/4) เปลี่ยนไปเป็นผลึกน้ำแข็ง ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเกิดผลึกน้ำแข็งจะถูกกำจัดออก ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในวัฏภาคที่ยังไม่แข็งตัวเพิ่มขึ้นปานกลาง มีผลให้จุดเยือกแข็งลดต่ำลงเล็กน้อย ดังนั้นช่วง BC จึงยังคงเป็นลักษณะกราฟราบที่มีความชันลดต่ำลงเล็กน้อย ในช่วงแรกของ BC น้ำจะแยกตัวเป็นผลึกน้ำแข็งที่ค่อนข้างบริสุทธิ์ ในขณะที่ช่วงท้ายๆของ BC อาจเกิดของผสมยูเทคติก (eutectic mixtures) และสารประกอบของแข็งชนิดอื่นๆ ซึ่งมีองค์ประกอบและโครงสร้างที่ใหญ่ ในช่วงท้ายๆของ BC นี้ เนื้อเยื่อจะมีความซับซ้อนมาก เนื่องจากมีผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นทั้งในและนอกเซลล์ ที่จุด C น้ำจะเปลี่ยนรูปไปเป็นน้ำแข็งอย่างต่อเนื่องแต่จะมีน้ำที่สามารถแข็งตัวได้น้อยกว่าในช่วงแรกมาก การดึงความร้อนออกจำนวนหนึ่งในระหว่างช่วง CD จะมีผลทำให้อุณหภูมิต่ำลงต่ำกว่าช่วง BC หลังจากที่ถูกอุณหภูมิลดต่ำลงถึงจุด D ผลิตภัณฑ์จะยังคงมีน้ำที่สามารถแข็งตัวอยู่ได้บ้างถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าจุด eutectic สุดท้ายของผลิตภัณฑ์มาก (Karel et al., 1975)

2.5.1 อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็ง

อัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งเป็นเรื่องสำคัญที่มีความสัมพันธ์กับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สามารถแบ่งได้เป็น การแช่เยือกแข็งแบบช้า (slow freezing) การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (rapid หรือ quick freezing) และการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมาก (ultra rapid freezing) หลักในการกำหนดอัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งในระดับต่างๆ นั้นมีอยู่หลายวิธี เช่น (สายสนม ประดิษฐ์ดวง, 2539; Fennema, Powrie, and Marth, 1973)

2.5.1.1. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อหน่วยเวลา

หลักการนี้ไม่ค่อยเป็นที่พออนัก เพราะในช่วงที่ผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสถานะใน 1 องศาเซลเซียสที่เปลี่ยนไปจะไม่สม่ำเสมอตลอดการแช่แข็ง และเนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในตัวอย่างนั้นผันแปรอย่างมากในระหว่างการแช่เยือกแข็ง ในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยากที่จะใช้ค่าเฉลี่ยของอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตลอดช่วงเวลาของการแช่เยือกแข็ง

2.5.1.2 เวลาที่ผ่านไปในช่วงของอุณหภูมิที่ผลิตภัณฑ์แข็งตัว

หลักการนี้ใช้ช่วงความชันของส่วนของแผนภาพการแช่เยือกแข็งที่เป็นเส้นตรง (freezing plateau) โดยดูอัตราการแช่เยือกแข็ง (degree/unit time) ถ้าอุณหภูมิในช่วงของ freezing plateau ใช้เวลา 1 ชั่วโมง จัดเป็นอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ถ้าอุณหภูมิในช่วงของ freezing plateau ใช้เวลา 1-2 นาที จัดเป็นอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว วิธีนี้ค่อนข้างเหมาะสมเนื่องจากการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งจะเกิดขึ้นในช่วงระยะสุดท้ายของการแช่เยือกแข็ง

2.5.1.3 ลักษณะของชั้นหน้าน้ำแข็ง

ถ้ามีน้ำแข็งเกิดขึ้นเป็นแผ่นจนแยกส่วนที่เป็นของแข็งและของเหลวได้ จัดว่าเป็นอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ถ้าเกิดผลึกน้ำแข็งจำนวนมากมาย ไม่มีชั้นแยกให้เห็นชัดเจนจัดเป็นอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว ถ้าเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กมองไม่เห็นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจัดเป็นอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมาก หลักการนี้เป็นคำจำกัดความที่ดีตรวจสอบได้ แต่ไม่ค่อยแน่นอน

2.5.1.4 ความเร็วของการเกิดผิวหน้าน้ำแข็ง

โดยอาศัยความเร็วของผิวหน้าน้ำแข็งที่เคลื่อนที่เข้าไปจากผิวนอกของผลิตภัณฑ์เป็นหน่วยระยะทางต่อเวลา (เซนติเมตร/ชั่วโมง) หลักการนี้ถือว่าเหมาะสม เพราะสามารถวัดได้ค่อนข้างถูกต้อง อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งจากวิธีการแช่เยือกแข็งที่ต่างกัน โดยใช้หลักการวัดความเร็วของการเกิดผิวหน้าน้ำแข็ง แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งจากวิธีการแช่เยือกแข็งที่ต่างกัน โดยใช้หลักการวัดความเร็วของการเกิดผิวน้ำแข็ง

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

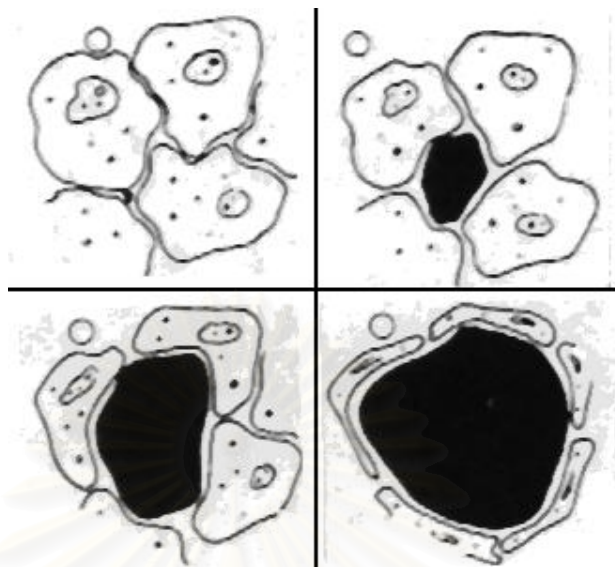
ที่มา : Boegh-Soerensen และ Jul (1985)

2.5.1.5 ตำแหน่งที่เกิดผลึกน้ำแข็ง

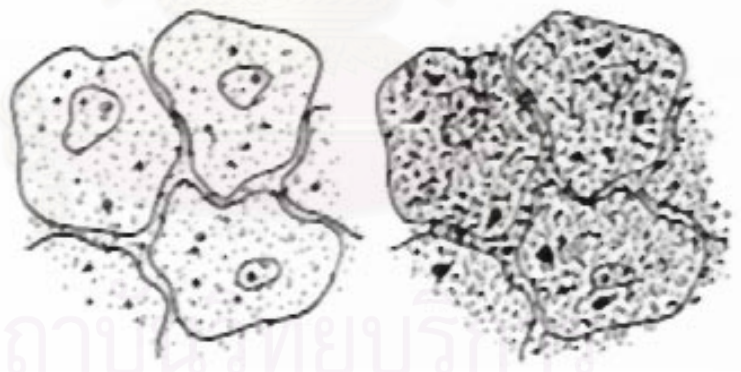
ผลึกน้ำแข็งจะเกิดขึ้นที่ส่วนใดของเซลล์เนื้อเยื่อก็ตาม ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็ง อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ และลักษณะตามธรรมชาติของเซลล์ โดยทั่วไปการแช่เยือกแข็งแบบช้าจะเกิดผลึกขนาดใหญ่และจะเกิดที่บริเวณภายนอกเซลล์ (extracellular) น้ำภายในเซลล์จะถูกดึงมาช่วยเพิ่มขนาดของผลึกที่ภายนอกเซลล์ เป็นผลให้เซลล์หดตัวลดขนาดลง แต่ถ้าเป็นการแช่เยือกแข็งแบบเร็วผลึกน้ำแข็งจะเกิดได้ทั้งในส่วนของภายในเซลล์ (intracellular) และภายนอกเซลล์ได้พร้อมๆ กัน มีขนาดของผลึกสม่ำเสมอกระจายทั่วไปจึงไม่ทำให้เซลล์เกิดการหดตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และ 2.5

2.5.1.6 วิธีอื่นๆ

นอกจากวิธีต่างๆ ดังกล่าว ยังมีวิธีการใช้อัตราการปลดปล่อยความร้อน (rate of heat liberation) และจำนวนเกล็ดน้ำแข็งที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ต่อหน่วยเวลา เป็นต้น



รูปที่ 2.4 การเกิดผลึกน้ำแข็งในเซลล์เนื้อเยื่อเมื่ออัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งเป็นแบบช้า
ที่มา : Fennema et al. (1973)



รูปที่ 2.5 การเกิดผลึกน้ำแข็งในเซลล์เนื้อเยื่อเมื่ออัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งเป็นแบบเร็ว
ที่มา : Fennema et al. (1973)

Aurell, Dagbjartsson และ Salomonsdottir (1976) ศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์กุ้งต้มสุกแช่เยือกแข็ง โดยใช้วิธีการแช่เยือกแข็งที่มีอัตราเร็วต่างกัน ได้แก่ Liquid Freon Freezant (LFF) process เปรียบเทียบกับ air-blast tunnel freezing และ plate freezing พบว่าผลิตภัณฑ์กุ้งต้มสุกแช่เยือกแข็งจะมีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็ง เท่ากับ 0.8 1.3 และ 1.2 ตามลำดับ และมีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็ง เท่ากับ 1.3 1.9 และ 1.5 ตามลำดับ

Giddings และ Hill (1978) ศึกษาผลของวิธีการแช่เยือกแข็งที่มีอัตราเร็วต่างกันต่อการเสื่อมเสียโครงสร้างทางลักษณะเนื้อสัมผัสของกุ้ง พบว่าการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว โดยใช้ liquid nitrogen และ freon เป็นสารให้ความเย็นมีผลต่อการทำลายโครงสร้างของกุ้งน้อยมาก โดยผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจะเกิดอยู่ภายในเซลล์ และเส้นใยยังคงสมบูรณ์อยู่ ในขณะที่การแช่เยือกแข็งแบบช้า ที่อุณหภูมิ -10 และ -29 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งและการโตของผลึกน้ำแข็งอยู่ภายนอกเซลล์ ผิวของกุ้งจะแห้ง หดตัว และยึดติดกันแน่น เมื่อนำกุ้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งจากทั้งสองวิธีไปละลายน้ำแข็ง พบว่ากุ้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า จะมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็งออกมากกว่ากุ้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว

Pan และ Yeh (1993) ศึกษาผลของวิธีแช่เยือกแข็งที่มีอัตราเร็วต่างกัน (air-blast freezing และ liquid nitrogen freezing) และระยะเวลาเก็บรักษาต่อการเสื่อมเสียของเนื้อเยื่อกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon*) พบว่าหลังจากแช่แข็งทันที ช่องว่างระหว่าง muscle fiber bundles จะมากขึ้น โดยกุ้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็ว 3.4 เซนติเมตร/ชั่วโมง จะมีช่องว่างเกิดขึ้นมากกว่ากุ้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็ว 8.6-16.1 เซนติเมตร/ชั่วโมง ช่องว่างนี้จะมีระยะห่างมากขึ้นในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ความสามารถในการละลายของโปรตีนใน 0.6 M KCl ในกุ้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งจากทั้งสองวิธี ไม่มีความแตกต่างกันหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 4 สัปดาห์ กุ้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วย liquid nitrogen มีความสมบูรณ์ของกล้ามเนื้อสูงกว่ากุ้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธี air-blast แต่หลังจากเก็บรักษานานกว่า 1 เดือน พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน

2.5.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการแช่เยือกแข็ง

อุปกรณ์แช่เยือกแข็งแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 2 กลุ่ม (ธนกร โรจนกร, 2538) คือ อุปกรณ์แช่เยือกแข็งเชิงกล (mechanical refrigerators) และอุปกรณ์แช่เยือกแข็งแบบไครโอ-จินิก (cryogenic freezer) อุปกรณ์แช่เยือกแข็งเชิงกลจะใช้อากาศเย็น (cooled air) ของเหลวเย็น (cooled liquid) หรือผิวสัมผัสเย็น (cooled surface) เพื่อกำจัดความร้อนออกจากอาหาร ซึ่ง

การระเหย และการอัดตัวทำความเย็นจะเป็นวงจรต่อเนื่อง ส่วนอุปกรณ์แช่เยือกแข็งแบบไครโอจีนิกจะใช้คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจนเหลว หรือฟรียอนเหลวให้สัมผัสโดยตรงกับอาหาร

อุปกรณ์แช่เยือกแข็งที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่

2.5.2.1 อุปกรณ์แช่เยือกแข็งแบบที่อากาศเย็นมีการหมุนวน

(air-blast freezer)

เป็นการนำอาหารที่บรรจุหีบห่อหรือไม่บรรจุมาสัมผัสกับอากาศเย็นที่มีอุณหภูมิ -18 ถึง -40 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนแบบการพาความร้อน น้ำภายในอาหารจะเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง อากาศเย็นจะเคลื่อนที่ด้วยพัดลมเป็นตัวกลางเคลื่อนที่นำความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์ ความเร็วของอากาศเย็นที่ใช้จะอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 18 เมตรต่อวินาที แต่มักใช้ที่ความเร็วลม 2 ถึง 7 เมตรต่อวินาที ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอากาศเย็นที่เหมาะสมขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดของเครื่องมือ อุณหภูมิของอากาศเย็น และความหนาของชิ้นอาหาร ความเร็วของอากาศเย็นที่สูงจะลดความหนาของฟิล์มชั้นบางๆ (boundary film) ที่อยู่ล้อมรอบอาหาร ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่บริเวณผิวหน้าของอาหารจะสูงขึ้น อัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งจะขึ้นกับความเร็วลม อุณหภูมิของลมเย็น และอุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ที่นำมาแช่เยือกแข็ง (Karel et al., 1975) อุปกรณ์แช่เยือกแข็งชนิดนี้มีขนาดกะทัดรัด ต้นทุนค่อนข้างต่ำ และมีกำลังผลิตสูง อย่างไรก็ตามอากาศที่พัดหมุนเวียนและมีปริมาณมากสามารถก่อให้เกิดรอยไหม้จากการแช่เยือกแข็ง (freezer burn) และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้น มักเกิดกับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้ผ่านการบรรจุ นอกจากนี้ความชื้นจากอาหารจะเคลื่อนที่ไปยังอากาศและทำให้เกิดน้ำแข็งเกาะที่ขัดทำความเย็นและจำเป็นที่ต้องมีการละลายน้ำแข็งบ่อยครั้ง (ธนกร โรจนกร, 2538; Karel et al., 1975)

2.5.2.2 อุปกรณ์แช่เยือกแข็งแบบไครโอจีนิก (cryogenic freezer)

เป็นการแช่เยือกแข็งที่มีผลให้อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งสูง เนื่องจากการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า -60 องศาเซลเซียสหรือต่ำกว่า โดยใช้ไนโตรเจนหรือคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสถานะของเหลวหรือของแข็งเป็นสารทำความเย็น (Sebranek, 1982) ผลิตภัณฑ์ที่นำมาแช่เยือกแข็งจะบรรจุในภาชนะหรือไม่บรรจุในภาชนะก็ได้ นำมาสัมผัสกับสารทำความเย็น จากนั้นสารทำความเย็นจะดึงความร้อนออกจากอาหารเพื่อเปลี่ยนสถานะจากของเหลวหรือของแข็งเป็นก๊าซ ทำให้อาหารมีอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว (Fellows, 1990) ในงานวิจัยนี้ใช้ไนโตรเจนเหลวเป็นสารทำความเย็นซึ่งมีจุดเดือดที่ต่ำมากคือ -196 องศาเซลเซียส ทำให้สามารถนำความร้อนออกจากอาหารได้มาก มีความปลอดภัยในการใช้เนื่องจากไนโตรเจน

เป็นส่วนประกอบหลักของอากาศจึงไม่เป็นพิษ มีการสูญเสียน้ำออกจากอาหารน้อย และไม่ยอมให้ก๊าซออกซิเจนเข้าไปในอุปกรณ์ในระหว่างการแช่เยือกแข็ง (Karel et al., 1975)

2.6 การเก็บรักษาในสภาพแช่เยือกแข็ง

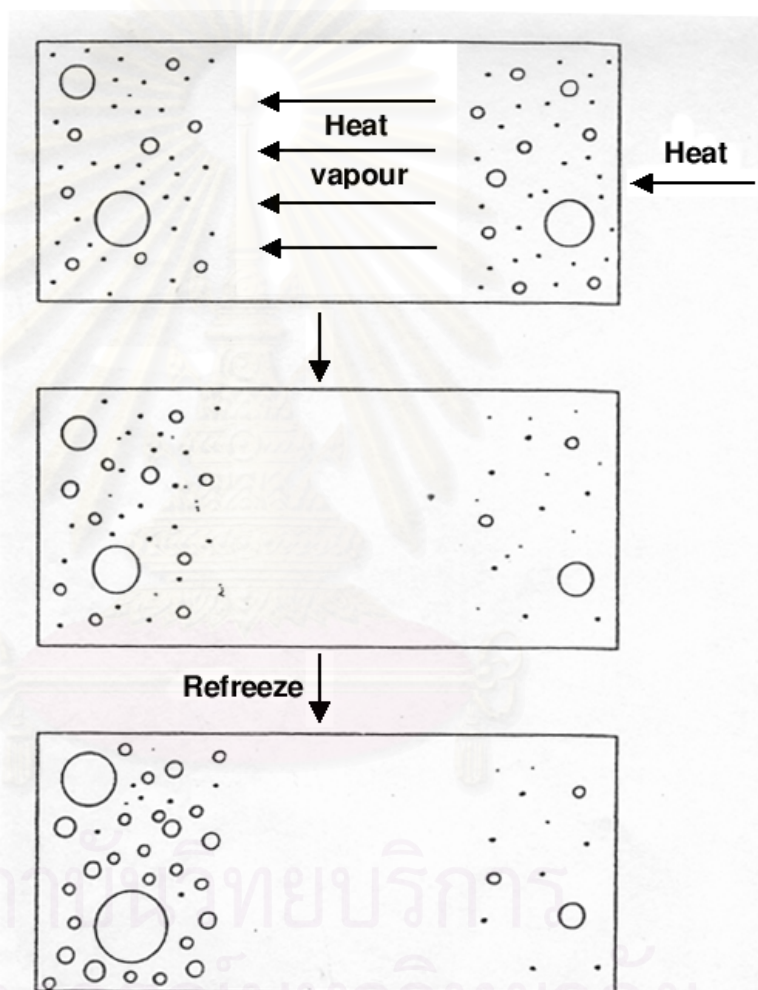
วิธีการแช่เยือกแข็งที่ดีและเหมาะสมเพียงอย่างเดียวจะไม่ช่วยให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งดีที่สุดได้ เพราะผลิตภัณฑ์นั้นจะต้องนำมาเก็บรักษาไว้ก่อนจะส่งจำหน่ายถึงผู้บริโภค ถ้าเก็บรักษาไว้ในสภาพที่ไม่เหมาะสม คุณภาพของผลิตภัณฑ์จะลดลงมาก โดยทั่วไปการเก็บรักษาอาหารแช่เยือกแข็งจำเป็นต้องเก็บในห้องที่มีระดับความเย็นเหมาะสม มีฉนวนป้องกันเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิของห้องให้คงที่อยู่ตลอดเวลา และควรอยู่ในระดับต่ำที่แน่ใจได้ว่าจุลินทรีย์ที่ปะปนมาจะหยุดการทำงานโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ เกิดขึ้นกับอาหาร อุณหภูมิในการเก็บรักษาควรจะรักษาให้อยู่ในระดับ -18 องศาเซลเซียสหรือต่ำกว่า (สายสนม ประดิษฐ-ดวง, 2539)

การสูญเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งในช่วงการเก็บรักษามักเป็นการสูญเสียคุณภาพในด้านกายภาพและเคมี (Fennema et al., 1973) ได้แก่

1. การตกผลึกใหม่ (recrystallization)

เป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดเนื่องจากผลึกน้ำแข็งมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขนาดขึ้นได้ในระหว่างการเก็บรักษา การตกผลึกใหม่ หมายถึง การเปลี่ยนแปลงใดๆ ที่เกี่ยวกับจำนวน ขนาด รูปร่าง และการเรียงตัวของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นหลังจากที่ได้ผ่านการกลายเป็นผลึกที่สมบูรณ์แล้ว การตกผลึกใหม่ที่เกิดขึ้นในอาหารและสำคัญที่สุดเรียกว่า การตกผลึกใหม่แบบไมเกรทอรี (migratory recrystallization) เป็นลักษณะที่ผลึกขนาดใหญ่ขยายขนาดขึ้นเนื่องจากการใช้ผลึกที่เล็กกว่าเป็นผลให้ขนาดเฉลี่ยของผลึกมีค่าเพิ่มขึ้น แต่จำนวนผลึกจะลดลง และพลังงานผิวหน้าของผลึกก็จะลดลงด้วย ที่อุณหภูมิและความดันคงที่พบว่า การตกผลึกใหม่แบบนี้เป็นผลมาจากความแตกต่างของพลังงานผิวหน้า (surface energy) ระหว่างผลึกขนาดใหญ่และผลึกขนาดเล็ก กล่าวคือ ผลึกที่มีขนาดเล็กจะมีรัศมีส่วนโค้งน้อยกว่า จึงไม่สามารถจับโมเลกุลที่ผิวหน้าได้แน่นหนาเท่ากับผลึกขนาดใหญ่ ดังนั้นผลึกขนาดเล็กจึงมีสมบัติในการละลายสูงกว่าผลึกขนาดใหญ่ การตกผลึกใหม่แบบนี้เกิดขึ้นได้เมื่ออุณหภูมิในช่วงการเก็บรักษาอาหารแช่เยือกแข็งไม่คงที่ เมื่อมีความร้อนเกิดขึ้นเนื่องจากการเปิดประตูหรือมีอากาศร้อนภายนอกเข้าไปสู่อุปกรณ์แช่เยือกแข็ง ผิวหน้าของอาหารที่อยู่ใกล้กับแหล่งความร้อนมากที่สุดจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ผลึกน้ำแข็งบางส่วนจะละลาย ดังนั้นผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่จะมีขนาดเล็กลงและผลึกที่มีขนาดเล็กที่สุด (น้อยกว่า 2

ไมโครเมตร) จะละลายเป็นน้ำ ผลึกที่กำลังหลอมเหลวนี้อาจมีค่าความดันไอน้ำและความชื้นสูงขึ้น จากนั้นโมเลกุลของน้ำจะเคลื่อนไปยังบริเวณที่มีความดันไอน้ำต่ำกว่า ทำให้อาหารที่อยู่ใกล้เคียง ความร้อนเกิดการสูญเสียน้ำ เมื่ออุณหภูมิลดลงอีกครั้งหนึ่งจะไม่เกิดนิวเคลียสใหม่แต่จะไปรวมตัวกับผลึกน้ำแข็งที่เหลืออยู่ทำให้ขนาดของผลึกเพิ่มขึ้น คุณภาพของอาหารก็จะลดลง เช่นเดียวกับการแช่เยือกแข็งที่มีอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า (Karel et al.,1975; Fellows,1990) การตกผลึกใหม่แบบไมเกรทอรีแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การตกผลึกใหม่แบบไมเกรทอรี (migratory recrystallization)
ที่มา : Fellows (1990)

2. การสูญเสียน้ำในระหว่างการเก็บรักษา น้ำบริเวณผิวหน้าของอาหารสูญเสียได้โดยการระเหิดของผลึกน้ำแข็งและการระเหยของน้ำ ทำให้ชิ้นอาหารหดตัวและแข็งขึ้น ผลิตรภัณฑ์มีน้ำหนักลดลง การสูญเสียน้ำโดยการระเหยกลายเป็นไอ ทำให้มีการหักเหของแสงแปลกไปจากบริเวณอื่นๆ สีของชิ้นอาหารจึงแปลกไป ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า freezer burn ซึ่งมักเกิดขึ้นกับผลิตรภัณฑ์แช่เยือกแข็งที่มีภาชนะบรรจุไม่เหมาะสม ผิวหน้าของผลิตรภัณฑ์จะเป็นรอยแห้งและมีสีน้ำตาลเกิดขึ้น ปรากฏการณ์นี้สามารถควบคุมได้โดยใช้ภาชนะบรรจุที่ป้องกันการซึมผ่านของไอได้ดี ควบคุมอุณหภูมิในการเก็บรักษาให้คงที่ และควรบรรจุให้อาหารแนบสนิทไปกับภาชนะบรรจุ (Fennema et al., 1973; Karel et al., 1975; Mallett, 1993)

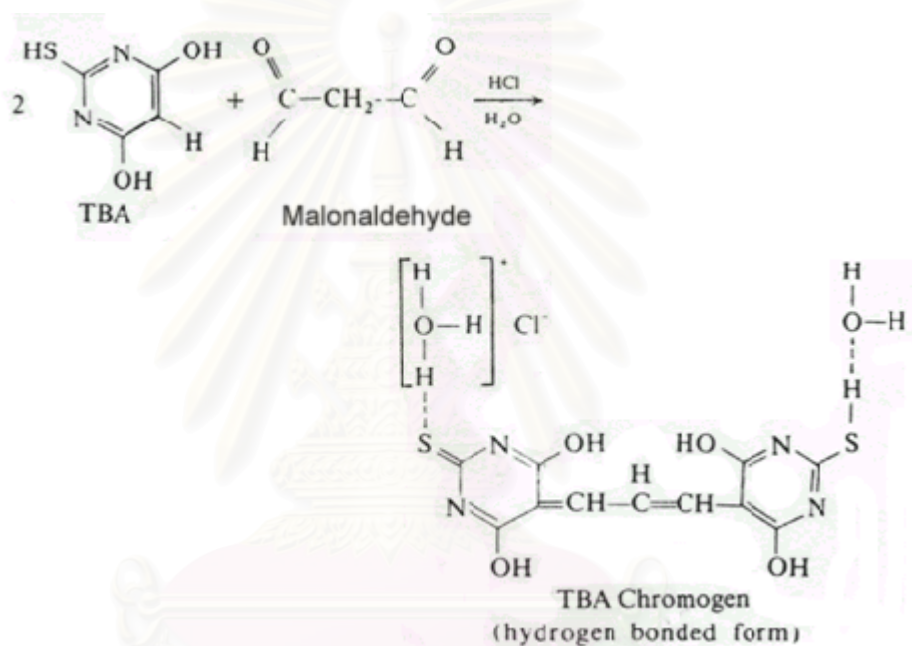
3. การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง เช่น ในระหว่างการเก็บรักษาปลา cod และ haddock ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -10 และ -18 องศาเซลเซียส และเก็บรักษาที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่าค่า pH และความเข้มข้นของเกลือเปลี่ยนแปลงไป โดยค่า pH จะลดลงในช่วงแรกของการเก็บรักษา หลังจากเก็บรักษาต่อไปพบว่าค่า pH จะเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับค่า pH เริ่มต้นก่อนการแช่เยือกแข็ง (van den Berg, 1961)

Bhobe และ Pai (1986) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของกุ้ง (*Metapenaeus dobsoni*) ที่บรรจุในถุงพลาสติกและผ่านการแช่เยือกแข็งโดยการจุ่มลงใน alcohol cooling bath ที่มีอุณหภูมิ -35 องศาเซลเซียส จนอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางเป็น -20 องศาเซลเซียส และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส พบว่าค่า pH จะเพิ่มขึ้นจาก 6.86 เป็น 9.50 ในระหว่างการเก็บรักษานาน 15 วัน ส่วนการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส พบว่าค่า pH จะลดลงจาก 6.84 ในช่วง 3 สัปดาห์แรกและหลังจากนั้นค่า pH จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย หลังจากการเก็บรักษานาน 6 เดือน กุ้งจะมีค่า pH เพิ่มขึ้นเป็น 7.4

4. การเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัส เช่น ในผลิตรภัณฑ์เนื้อปลา cod บด ที่แช่เยือกแข็งด้วย plate freezer และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -10 -20 และ -70 องศาเซลเซียส นาน 4 เดือน พบว่าถ้าเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูง (-10 องศาเซลเซียส) ก็ต้องใช้แรงในการตัดตัวอย่างให้ขาดสูงกว่าการเก็บรักษาที่ -70 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับพลังงานที่ต้องการใช้เพื่อให้ตัวอย่างขาดออกจากกัน (energy to break point) และพบว่าตัวอย่างที่เก็บที่ -10 องศาเซลเซียส นาน 2 เดือน มีลักษณะแห้งและเหนียวกว่าตัวอย่างที่เก็บที่ -20 และ -70 องศาเซลเซียส หลังจากเก็บนาน 4 เดือน ทุกตัวอย่างที่เก็บที่อุณหภูมิต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ในด้าน dryness, toughness และ fibrousness (Steen and Lambelet, 1997)

5. การเกิดออกซิเดชันของไขมัน

การตรวจสอบและติดตามการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน อาจใช้วิธีหา thiobarbituric acid (TBA) number โดย TBA number เป็นค่าที่ใช้วัดการเสื่อมเสียของไขมัน จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน วัดเป็นจำนวนมิลลิกรัมของมาโลนาลดีไฮด์ (malonaldehyde) ในตัวอย่าง 1,000 กรัม ปฏิกิริยาของ TBA กับ malonaldehyde ซึ่งเป็น secondary oxidation product ของอัลดีไฮด์ที่ไม่อิ่มตัวที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะได้ TBA pigment สีแดง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และสามารถวัดความเข้มของสีที่เกิดขึ้นโดยใช้ spectrophotometer วิธีนี้มีข้อดีคือ สามารถใช้ได้กับอาหารทั้งชิ้น และทดสอบได้โดยตรงไม่ต้องสกัดไขมัน (Rossell, 1983)



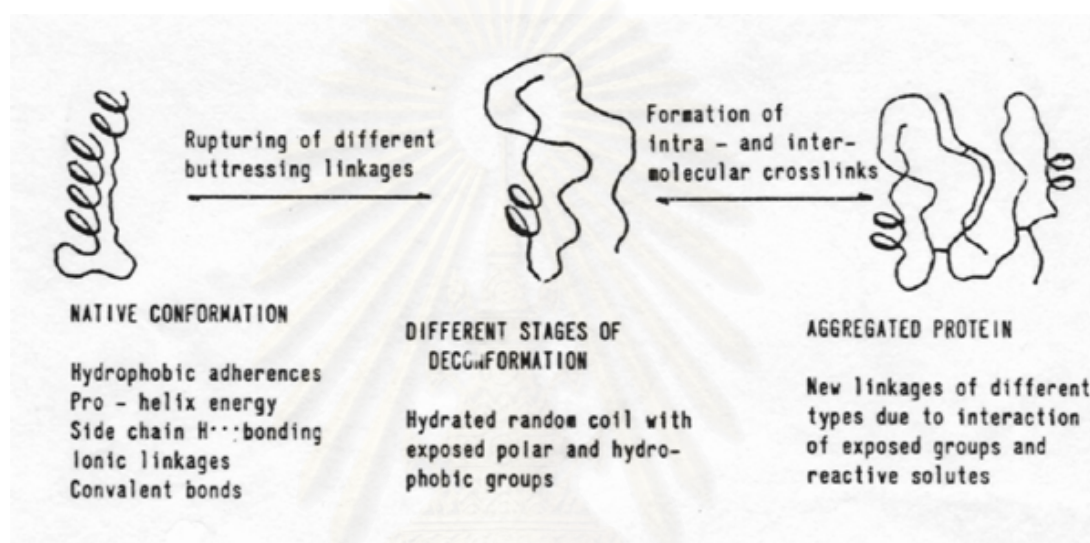
รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาของสาร TBA กับ malonaldehyde

ที่มา : Rossell (1983)

6. การสูญเสียความสามารถในการละลายของโปรตีน

โปรตีนกล้ามเนื้อ (myofibrillar protein) เช่น actin myosin actinomyosin เป็นต้น มีประมาณร้อยละ 65-75 ของโปรตีนทั้งหมด เป็นกลุ่มโปรตีนที่ละลายได้ในสารละลายเกลือที่มีค่า ionic strength ประมาณ 0.5 (วรรณวิบูลย์ กาญจนกฤษกร, 2539) ดังนั้นในการศึกษาการสูญเสียสภาพทางธรรมชาติของโปรตีนในระหว่างการเก็บรักษาอาหารแช่เยือกแข็งมักติดตามความสามารถในการละลายของ myofibrillar protein ในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ 0.5% หรือ สารละลายโปแตสเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.6 โมลาร์ (MFRD, 1987)

Sikorski (1977) รายงานว่าการสูญเสียความสามารถในการละลายของโปรตีนในระหว่างการทำแช่เยือกแข็งและการเก็บรักษาในสภาพแช่เยือกแข็งนั้นอาจเกิดเนื่องจากการจับตัวกันของโปรตีน (รูปที่ 2.8) และยังพบว่าในปลาหลายพันธุ์ การละลายได้ของโปรตีนที่ลดลงมักจะมีผลร่วมกับการเสื่อมเสียทางลักษณะเนื้อสัมผัส ได้แก่ มีความเหนียว (toughness), chewiness, rubberiness, stringiness เพิ่มขึ้น หรือมีลักษณะปรากฏ เช่น แข็งเป็นขุย (cardboardly, crumby, dry) หรือเป็นเส้นใย (fibrous)



รูปที่ 2.8 ปัจจัยทางเคมีและกายภาพต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรตีน

ที่มา : Sikorski (1977)

7. การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีต่างๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงของโปรตีนและไขมันในผลิตภัณฑ์เนื้อปลา pink perch (*Nemipterus japonicus*) บดที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วย contact plate freezer ที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 ± 1 องศาเซลเซียส นาน 180 วัน พบว่าปริมาณ crude protein ไขมันทั้งหมด และโปรตีนที่ละลายในน้ำ ลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญในช่วงแรกของการเก็บรักษา ในขณะที่ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ในสารละลายเกลือลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ตลอดช่วงการเก็บรักษา ส่วนปริมาณกรดไขมันอิสระ ค่าเปอร์ออกไซด์ trimethylamine และ total volatile base เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ตลอดช่วงการเก็บรักษา (Verma and Srikar, 1994)

Bhobe และ Pai (1986) ศึกษาสมบัติในด้านต่างๆ ของกิ้ง (*Metapenaeus dobsoni*) ที่บรรจุในถุงพลาสติกและแช่เยือกแข็งโดยการจุ่มลงใน alcohol cooling bath ที่มีอุณหภูมิ -35 องศาเซลเซียส จนอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางเป็น -20 องศาเซลเซียส และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส พบว่าค่า TMA จะเพิ่มขึ้นทีละน้อยในระหว่างการเก็บรักษา โปรตีนที่ละลายได้ในสารละลายเกลือจะลดลงจาก 10 กรัม / เนื้อกิ้ง 100 กรัม เป็น 6 กรัม / เนื้อกิ้ง 100 กรัม ในระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากน้ำอิสระที่มีอยู่ในกิ้งลดลง ส่งผลให้ความเข้มข้นของเกลือสูงขึ้น โปรตีนจึงสูญเสียสภาพทางธรรมชาติ การสูญเสียสภาพทางธรรมชาติของโปรตีนยังมีผลให้เกิดการคลัสต์ตัวของสายโพลีเปปไทด์อีกด้วย

2.7 การละลายผลึกน้ำแข็ง

การละลายผลึกน้ำแข็งเป็นขั้นตอนที่ค่อนข้างซับซ้อนและอาหารมีแนวโน้มที่จะเกิดการเสื่อมเสียเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี กายภาพ และ จุลินทรีย์ เนื่องจาก (Karel et al., 1975)

1. การละลายน้ำแข็งของตัวอย่างอาหารที่เป็นของแข็งจะเกิดช้ากว่าการแช่เยือกแข็งเมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิต่างๆ
2. ความแตกต่างของอุณหภูมิมะหว่างการละลายจะมีค่าน้อยกว่าในระหว่างการแช่เยือกแข็ง
3. รูปแบบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการละลายน้ำแข็ง เป็นที่ต้องการน้อยกว่าในระหว่างการแช่เยือกแข็ง

ในระหว่างการละลายน้ำแข็งเป็นโอกาสที่อาหารจะได้รับความเสียหายจากสาเหตุต่างๆ มากที่สุด เช่น ความเข้มข้นของของเหลว การเกิดตกผลึกใหม่ ความเสียหายเชิงกล และการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งการละลายน้ำแข็งอย่างรวดเร็วจะลดปัญหาเรื่องความเสียหายดังกล่าวได้

ผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีที่มีอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว นั้นหากนำมาผ่านขั้นตอนการละลายน้ำแข็งที่ไม่เหมาะสมและไม่มีการควบคุมที่ดีพอก็จะทำให้ผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งนั้นมีคุณภาพที่ไม่ดีได้ (Giddings and Hill, 1978)

ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าขั้นตอนการละลายผลึกน้ำแข็งเป็นแหล่งที่ทำให้เกิดความเสียหายได้มากกว่าในขั้นตอนการแช่เยือกแข็ง (Karel et al., 1975) การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายหลังจากที่ละลายน้ำแข็งออกจะเกี่ยวข้องกับปริมาณน้ำที่ไหลออกมานอกเซลล์ (drip) ถ้าใช้วิธีการละลายน้ำแข็งที่ดีจะทำให้ปริมาณน้ำที่ไหลออกมานอกเซลล์น้อย มีการสูญเสียคุณค่าทางอาหารน้อย น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ลดลงน้อย คุณภาพของเนื้อสัมผัส ตลอดจนรสชาติ และสีไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก (มยุรี จัยวัฒน์, 2527)

Shamasunder และ Prakash (1994) ศึกษาสมบัติของโปรตีนในกุ้ง (*Metapenaeus dobsoni*) จากน้ำที่ไหลออกมานอกเซลล์ โดยนำกุ้งแช่เยือกแข็งด้วย contact plate freezer ที่อุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 7 ± 2 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมง พบว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดและโปรตีนในน้ำที่ไหลออกมานอกเซลล์วัดได้ 4.25 ± 0.20 % และ 4.8 ± 0.25 % ตามลำดับ และจากการศึกษาองค์ประกอบของกรดอะมิโนในน้ำที่ไหลออกมานอกเซลล์โดยวิธี SDS - Polyacrylamide gel electrophoresis พบว่าโปรตีนหลายตัวมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 11,000–24,000 ซึ่งจัดเป็นโปรตีนกลุ่มที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

วิธีการละลายน้ำแข็งมีอยู่ 2 หลักการ (IIR, 1972) คือ การนำความร้อนจากผิวไปสู่ภายในผลิตภัณฑ์ และการสร้างความร้อนให้เกิดขึ้นภายในผลิตภัณฑ์ หลักการแรกทำได้โดย จัดให้ผิวของผลิตภัณฑ์สัมผัสกับแหล่งให้ความร้อน เช่น แผ่นโลหะร้อน อากาศร้อน น้ำอุ่น หรือไอน้ำภายใต้สุญญากาศ ส่วนหลักการที่สองจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในผลิตภัณฑ์โดยใช้วิธีไดอิเล็กทริก หรือไมโครเวฟ แต่วิธีการละลายน้ำแข็งด้วยการให้ความร้อนที่ผิวของผลิตภัณฑ์นิยมใช้มากกว่าการทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในผลิตภัณฑ์

2.7.1 การละลายน้ำแข็งด้วยวิธีให้ความร้อนที่ผิวของผลิตภัณฑ์

การละลายน้ำแข็งด้วยวิธีนี้สามารถทำให้เวลาในการละลายน้ำแข็งลดลงได้โดยการลดขนาดของผลิตภัณฑ์ เพิ่มความแตกต่างอุณหภูมิที่ผิวของผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งและสภาพแวดล้อม หรือเพิ่มการเคลื่อนที่ของตัวกลางในสภาพแวดล้อมให้เร็วกว่าผิวของผลิตภัณฑ์ ในระหว่างการละลายน้ำแข็งด้วยวิธีนี้จะเกิดขึ้นของส่วนที่ไม่เป็นน้ำแข็ง (unfrozen material) ซึ่งมีค่าสภาพนำความร้อนต่ำกว่าน้ำแข็ง ชั้นที่เกิดขึ้นนี้จะมีหนาเพิ่มขึ้นทำให้ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนที่ผิวจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ วิธีนี้จะได้ผลดีต่อเมื่อเกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ผิวของผลิตภัณฑ์และสภาพแวดล้อม โดยต้องควบคุมไม่ให้อุณหภูมิสภาพแวดล้อมสูงจนเกินไป เพราะอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในด้านสี หรือรูปร่างในบางผลิตภัณฑ์ได้ (Fennema et al., 1973; Boegh-Soerensen and Jul, 1985)

การละลายน้ำแข็งด้วยวิธีให้ความร้อนที่ผิวของผลิตภัณฑ์นี้ สามารถใช้ตัวกลางในการให้ความร้อนได้หลายแบบ ได้แก่ อากาศนิ่ง (still air) อากาศที่มีการเคลื่อนที่ (moving air) น้ำ ไอน้ำภายใต้สุญญากาศ เป็นต้น (ธนกร โรจนกร, 2538; Fennema et al., 1973)

2.7.2 การละลายน้ำแข็งด้วยวิธีทำให้เกิดความร้อนภายในผลิตภัณฑ์

วิธีนี้ทำให้เกิดความร้อนภายในผลิตภัณฑ์โดยให้สนามไฟฟ้าเข้าไปในผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าที่อยู่ภายใน โมเลกุลภายในผลิตภัณฑ์จะเกิดความร้อนและทำให้อาหารมีอุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสมบัติทางไฟฟ้าของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด และเนื่องจากอาหารไม่ได้เป็นสารเนื้อเดียวกัน ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนย่อมแตกต่างกัน การละลายน้ำแข็งด้วยวิธีนี้สามารถลดเวลาลงเหลือเพียงไม่กี่นาทีเท่านั้น แต่ต้องใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ในระหว่างการละลายน้ำแข็งอัตราการให้ความร้อนจะเพิ่มขึ้นซึ่งอาจจะเป็นปัญหาเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ได้ ในปัจจุบันนิยมใช้วิธีนี้เพื่อ tempering และให้ความร้อนกับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง (ธนกร โจรจนกร, 2538; Boegh-Soerensen and Jul, 1985) การละลายน้ำแข็งด้วยวิธีนี้สามารถทำได้หลายแบบ ได้แก่ การใช้ความต้านทานทางไฟฟ้าโดยผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในผลิตภัณฑ์ การใช้ความถี่สูงในช่วง 915-2,450 เมกกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นช่วงไมโครเวฟ

การละลายน้ำแข็งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟนั้นผลิตภัณฑ์ที่นำมาละลายน้ำแข็งควรเป็นเนื้อเดียวกันและมีรูปร่างสม่ำเสมอ ถ้าผลิตภัณฑ์มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอจะเกิดความร้อนไม่สม่ำเสมอ เช่นบางส่วนของอาจเกิดความร้อนมากเกินไป (Fennema et al., 1973) ความร้อนที่เกิดจากคลื่นไมโครเวฟจะเกิดที่จุดซึ่งอาหารสัมผัสกับไมโครเวฟแล้วจึงค่อยกระจายตัวออกไปยังส่วนอื่น เนื่องจากผลของการเดือดของน้ำโดยการนำความร้อนและเป็นไปอย่างต่อเนื่อง (สายสนมประดิษฐ์ดวง, 2539)

ในผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็ง การเปลี่ยนแปลงคุณภาพในด้านต่างๆ อาจเกิดได้ในทุกขั้นตอนของกระบวนการแช่เยือกแข็ง ดังนั้นจึงต้องควบคุมการดำเนินการให้เหมาะสม ได้มีการศึกษาพบว่า วิธีการแช่เยือกแข็ง วิธีการละลายน้ำแข็ง และระยะเวลาในการเก็บรักษามีผลต่อสมบัติทางความร้อน และสมบัติทางเคมีกายภาพของกุ้งแม่น้ำ (*Macrobrachium rosenbergii*) ที่แช่เยือกแข็งด้วย still freezer ที่อุณหภูมิ -29 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และ blast freezer ที่อุณหภูมิและเวลาเดียวกัน ละลายน้ำแข็งด้วยวิธีเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส นาน 18 ชั่วโมง วิธีแช่ในน้ำที่มีการหมุนเวียนอุณหภูมิ 22 ± 2 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที และวิธีผสมของไมโครเวฟและการแช่ในน้ำที่มีการหมุนเวียน ทำให้โปรตีนในกุ้งเปลี่ยนแปลงได้ง่ายต่อการแช่เยือกแข็งและการละลายน้ำแข็งโดยเฉพาะในช่วง 1 เดือนแรกของการเก็บรักษา การไม่คงตัวของโปรตีนจะไม่ขึ้นอยู่กับวิธีการแช่เยือกแข็ง และการมีหรือไม่มีเปลือก แต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราเร็วของการละลายน้ำแข็ง การใช้ไมโครเวฟแม้จะเป็นวิธีที่เร็วแต่ก็เป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียสภาพทางธรรมชาติของโปรตีนได้ โดยเป็นผลให้โปรตีนไม่มีความคงตัว (Srinivasan, Xiong, and Blanchard, 1997) นอกจากนี้ยังพบว่าวิธีการแช่เยือกแข็งและการ

ละลายน้ำแข็งมีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของกุ้งในระหว่างการเก็บรักษา 6 เดือน โดยค่า TBA ในกุ้งจะเพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดในเวลา 3 เดือนและหลังจากนั้นจะมีแนวโน้มลดลง กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันจะขึ้นอยู่กับกรรมวิธีแปรรูปหรือไม่มีเปลือกของกุ้ง และอัตราเร็วในการละลายน้ำแข็ง ลักษณะเนื้อสัมผัสในรูปแรงเฉือนของกุ้งจะลดลงเล็กน้อย (ร้อยละ 3.5-8.1) แต่ในกุ้งที่ผ่านการต้มให้สุกจะมีค่าแรงเฉือนเพิ่มขึ้น (ร้อยละ 13.0-27.9) ในระหว่างการเก็บรักษา การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการต้มในกุ้งที่ไม่มีเปลือกจะสูงกว่าในกุ้งที่มีเปลือกคือร้อยละ 20.2 และ 14.4 ตามลำดับ และมีความสัมพันธ์สอดคล้องไปกับความเหนียวของกุ้งที่เพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์ทาง electrophoretic พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของโปรตีน แต่ความเข้มข้นของแถบโปรตีนนั้นลดลงอย่างช้าๆ ในระหว่างการเก็บรักษา (Srinivasan, Xiong, Blanchard, and Tidwell, 1998)

การละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็งซ้ำ (freeze-thaw cycle) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็ง โดยพบว่าชิ้นเนื้อปลา cod (cod fillet block) ที่ผ่านการละลายน้ำแข็งและแช่เยือกแข็งซ้ำเป็นครั้งที่ 2 จะสูญเสียความสามารถในการละลายของโปรตีนในกลุ่ม myofibrillar protein โดยการละลายจะลดลงอย่างรวดเร็วกว่าปลาที่ผ่านการแช่เยือกแข็งเพียงครั้งเดียว และยังพบว่าค่าความสามารถในการอุ้มน้ำ (water holding capacity) ก็ลดลงเช่นกัน แต่เมื่อวิเคราะห์ proton spin-spin relaxation times โดยวิธี Nuclear Magnetic Resonance (NMR) เพื่อประมาณการกระจายตัวของ relaxation times ซึ่งเกี่ยวข้องกับการกระจายตัวของน้ำที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้าง ก็ไม่พบการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของน้ำจึงคาดว่า การสูญเสียความสามารถในการละลายของโปรตีนในกลุ่ม myofibrillar protein นั้นไม่ได้มีสาเหตุมาจากการคลายตัวออกของโปรตีนอย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ยังพบว่าการละลายน้ำแข็งที่ใช้เวลานาน (ประมาณ 30 ชั่วโมง) ก่อนที่จะมีการแช่เยือกแข็งใหม่นั้นจะมีผลทำให้ปลาที่ผ่านการให้ความร้อนมีสีเทา มีกลิ่นรสที่ไม่สด และมีกลิ่นหืนในระหว่างการเก็บรักษา (Hurling and McArthur, 1996)

ในผลิตภัณฑ์กุ้งแม่น้ำ (*Macrobrachium rosenbergii*) ที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำหลายๆ ครั้ง โดยแช่เยือกแข็งด้วย still freezer ที่อุณหภูมิ -29 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และละลายน้ำแข็งด้วยวิธีแช่ในน้ำที่มีการหมุนเวียนอุณหภูมิ 22 ± 2 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที จากนั้นแบ่งกุ้งที่ผ่านการละลายน้ำแข็งแล้วมาต้มในน้ำเดือดนาน 2 นาที พบว่าแรงเฉือนที่ใช้ตัดตัวอย่างให้ขาดออกจากกันในกุ้งที่ไม่ผ่านการต้มหลังจากผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ 5 ครั้งไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในขณะที่กุ้งที่ผ่านการต้มมีค่าแรงเฉือนลดลงหลังจากผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ 3 ครั้ง จากการวิเคราะห์ทาง electrophoretic พบว่า myosin actin และ myofibrillar protein ลดลงเล็กน้อยเมื่อผ่านการแช่

เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำหลายๆ ครั้ง ค่าเอนทาลปีของการสูญเสียสภาพทางธรรมชาติของโปรตีนในกุ้งที่ไม่ผ่านการต้มมีค่าลดลงจาก 16.6 J/g เป็น 13.5 J/g หลังจากผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ 1 ครั้ง และหลังจากนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ค่า TBA ในกุ้งที่ไม่ผ่านการต้มจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อกุ้งผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำในครั้งที่ 1-3 และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำในครั้งที่ 4 กุ้งที่ผ่านการต้มจะมีการสูญเสียไขมันร้อยละ 11.7 แต่เมื่อผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำหลายๆ ครั้ง พบว่ากุ้งจะมีการสูญเสียไขมันเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 15.2-17.8 (Srinivasan, Xiong, Blanchard, and Tidwell, 1997)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

กุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon*) ที่ใช้มีขนาด 70-80 ตัวต่อกิโลกรัม ซื้อมาจากตลาดสามย่าน กรุงเทพมหานคร หลังจากนั้นนำมาแช่ในภาชนะซึ่งบรรจุน้ำแข็ง ทำความสะอาดโดยล้างด้วยน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิไม่เกิน 5 องศาเซลเซียส จากนั้นตัดแต่งโดยเด็ดหัว ปอกเปลือก จะได้กุ้งเนื้อไว้หางแบบเต็มตัว (peeled tail on, round shrimp) ล้างด้วยน้ำเย็นอีกครั้งก่อนวางพักบนตะแกรงเพื่อให้สะเด็ดน้ำ

3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกุ้งกุลาดำสด

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ ดังนี้

3.2.1.1 ปริมาณความชื้น โดยดัดแปลงจากวิธี AOAC (1995) section 39.1.02 B (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.1)

3.2.1.2 ปริมาณโปรตีน โดยดัดแปลงจากวิธี AOAC (1995) section 39.1.15 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.2)

3.2.1.3 ปริมาณไขมัน โดยดัดแปลงจากวิธี AOAC (1995) section 39.1.05 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.3)

3.2.1.4 ปริมาณเถ้า โดยดัดแปลงจากวิธี AOAC (1995) section 35.1.14 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.4)

3.2.1.5 ปริมาณคาร์โบไฮเดรต คำนวณด้วยวิธีผลต่าง โดยนำองค์ประกอบอื่นๆ หักออกจาก 100

3.2.2 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของกุ้งกุลาดำสด

วิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพ ดังนี้

3.2.2.1 ค่า thiobarbituric acid number (TBA) (Pearson, 1976) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.5)

3.2.2.2 ค่าความสด โดยวัดในรูปของปริมาณน้ำทั้งหมดที่ระเหยได้ (MFRD, 1987) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.6)

3.2.2.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (Bhobe and Pai, 1986) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.7)

3.2.2.4 ปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือ (MFRD, 1987) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.8)

3.2.2.5 ลักษณะเนื้อสัมผัสของกึ่งกูลาดำแช่เยือกแข็ง โดยวัดในรูปของแรงต้านทานการตัดขาด (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.9)

3.2.3 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการแช่เยือกแข็งกึ่งกูลาดำด้วยวิธีแบบลมพ่น

นำกึ่งกูลาดำที่ผ่านการทำความสะอาดและตัดแต่งแล้วมาแช่เยือกแข็งด้วยตู้แช่เยือกแข็งแบบลมพ่น ลักษณะเป็นตู้แช่เยือกแข็งและมีปล่องลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 เซนติเมตร สำหรับให้ลมเย็นผ่านไปสู่อุปกรณ์ที่วางอยู่บนตะแกรงซึ่งวางครอบบนปล่องลม ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2 กำลังการทำงาน 1.00 แรงม้า แปรความเร็วลมเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 4 6 และ 8 เมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิประมาณ -28 ± 2 องศาเซลเซียส วัดความเร็วลมด้วยเครื่องวัดความเร็วลม (Digicon, รุ่น DA-42) ทำการแช่เยือกแข็งโดยใช้กึ่งครั้งละ 20 ตัว ติดตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของกึ่งด้วยสายเทอร์โมคัปเปิล ชนิด Copper-constantan (Type-T) โดยเสียบเทอร์โมคัปเปิลเข้าไปยังบริเวณจุดกึ่งกลางของปล่องที่ 2 ของกึ่งกูลาดำ บันทึกอุณหภูมิด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิและเวลา (Yokogawa, รุ่น LR 4210) โดยบันทึกอุณหภูมิเริ่มต้นของกึ่ง (จะควบคุมให้อยู่ที่ประมาณ 20 องศาเซลเซียส) และเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งจนอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของกึ่งมีค่า -18 องศาเซลเซียส

คำนวณอัตราเร็วที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งกึ่งกูลาดำ (ดัดแปลงจาก Pan and Yeh, 1993) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.10) และวิเคราะห์หาร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็ง (% Freezing loss) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.11) ลักษณะเนื้อสัมผัสของกึ่งกูลาดำ โดยวัดในรูปของแรงต้านทานการตัดขาด

วางแผนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Completely Randomized Design (CRD) ทดลอง 4 ซ้ำ วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple range test



(a)

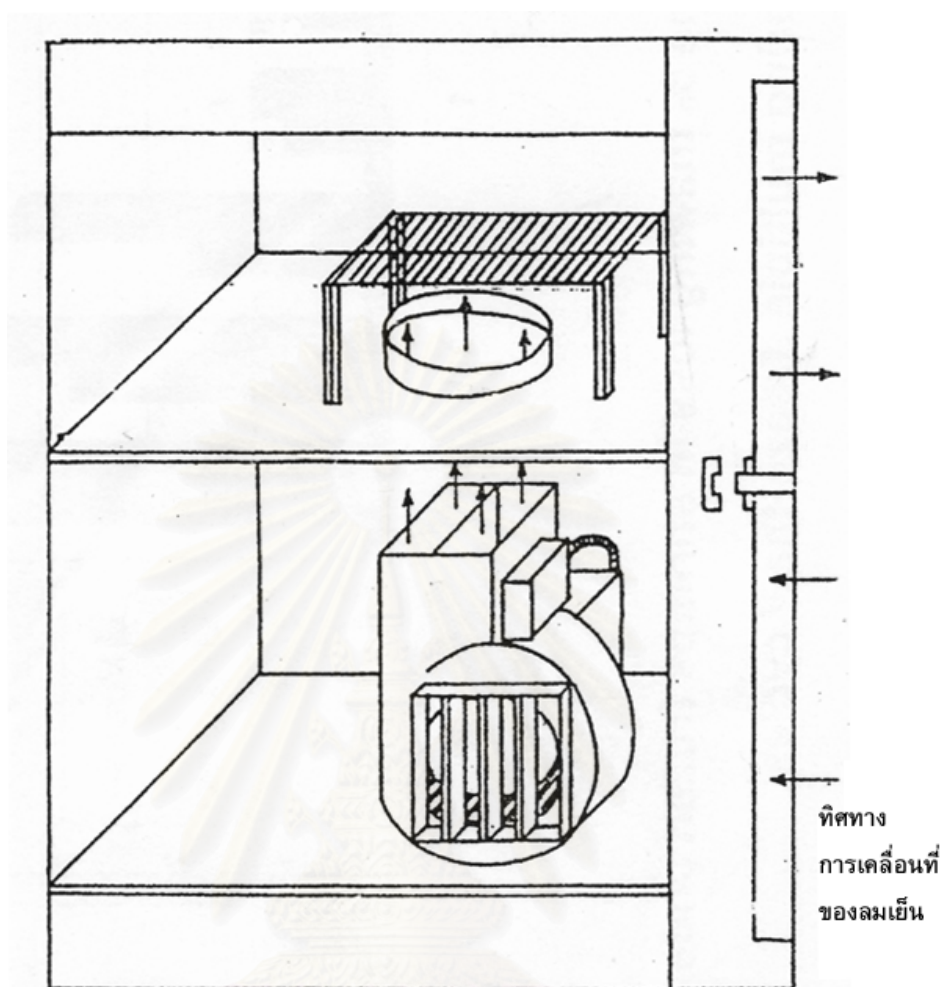


(b)

รูปที่ 3.1 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมพ่น (air-blast freezer) ที่ใช้ในงานวิจัย

(a) แผงควบคุมการเปิด-ปิดเครื่อง และความเร็วลมที่ใช้

(b) เครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมพ่น



รูปที่ 3.2 ทิศทางการเคลื่อนที่ของลมเย็นในเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมพ่น
ที่มา : พันธิพา จันทวัฒน์ และคณะ (2528)

3.2.4 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการแช่เยือกแข็งกึ่งกลาดำด้วยวิธีแบบโครโอจินิก นำกึ่งกลาดำที่ผ่านการทำความสะอาดและตัดแต่งแล้วมาแช่เยือกแข็งด้วย Cryo-Test Chamber Nitrogen Freezer ซึ่งประกอบด้วยถังบรรจุไนโตรเจนเหลว (Taylor-Wharton, Model XL-55HP) และ Cryo-Test Chamber (Allentown, Penna, USA, Model F831059E) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 แปรอุณหภูมิเป็น 4 ระดับ ได้แก่ -70 -80 -90 และ -100 องศาเซลเซียส ทำการแช่เยือกแข็งโดยใช้กึ่งครั้งละ 20 ตัว ติดตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของกึ่งกลาดำด้วยวิธีเช่นเดียวกับการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่น

ประเมินผลเช่นเดียวกับข้อ 3.2.3



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 3.3 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบโครโอจินิคที่ใช้ในงานวิจัย (Cryo-Test Chamber Nitrogen Freezer)

(a) ถังบรรจุไนโตรเจนเหลว (Taylor-Wharton, Model XL-55HP)

(b) Cro-Test Chamber (Allentown, Penna, USA, Model F831059E)

(c) Cryo-Test Chamber Nitrogen Freezer

3.2.5 การศึกษาผลของวิธีการละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ (freeze-thaw cycles) ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วในข้อ 3.2.3 และแบบโครโอจีนิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วในข้อ 3.2.4

นำกุ้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นและแบบโครโอจีนิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วบรรจุในถุงพลาสติก (nylon/HDPE) และปิดผนึกด้วยเครื่องปิดผนึกแบบสุญญากาศ (บ.อีสท์เอเชียติก) แบ่งตัวอย่างมาประเมินผลการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพในกุ้งกุลาดำที่ผ่านการละลายน้ำแข็งหลังจากแช่เยือกแข็งทันที (freeze-thaw cycle ที่ 0) โดยแปรวิธีละลายน้ำแข็งเป็น 2 วิธีได้แก่ วิธีละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟซึ่งมีกำลังไฟ 800 วัตต์ (Sharp รุ่น R-251) ใช้โปรแกรมละลายน้ำแข็งอย่างง่าย (easy defrost) ซึ่งมีกำลังความร้อนร้อยละ 70 และวิธีละลายน้ำแข็งในตู้เย็นที่มีอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส (ยี่ห้อ Sharp รุ่น W-Reverse) ทุกวิธีในการละลายน้ำแข็งจะทำจนกระทั่งอุณหภูมิภายในกุ้งลดลงจนถึงประมาณ 0 องศาเซลเซียส จากนั้นนำตัวอย่างที่เหลือเก็บในตู้แช่เยือกแข็งแบบนอนที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส (ยี่ห้อ Sanyo บ.ยูไนเต็ดอิน สทูลเมนท์ จำกัด) เป็นเวลานาน 3 วัน จากนั้นนำตัวอย่างมาละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟและที่อุณหภูมิตู้เย็น (นับเป็น 1 cycle ของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็ง) แบ่งตัวอย่างมาประเมินผลการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพในกุ้งกุลาดำที่ผ่านภาวะการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งดังกล่าว (freeze-thaw cycle ที่ 1) จากนั้นนำตัวอย่างกุ้งกุลาดำส่วนที่เหลือไปผ่านภาวะการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งเช่นเดิม โดยการเก็บในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส นาน 3 วัน จากนั้นทำการละลายน้ำแข็ง ทำการแช่เยือกแข็งและละลายน้ำแข็งซ้ำเช่นนี้อีก 3 ครั้ง โดยการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำในแต่ละครั้งจะประเมินผลเช่นเดียวกับการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งครั้งแรก

การวิเคราะห์

- ค่า thiobarbituric acid number (TBA)
- ค่าความสด โดยวัดในรูปของปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้
- ความเป็นกรด-ด่าง
- ปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือ
- ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็ง (% Thawing loss)

(รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.12)

- ลักษณะเนื้อสัมผัสของกุ้งกุลาดำแช่เยือกแข็ง โดยวัดในรูปของแรงต้านทานการ

ตัดขาด

- ลักษณะทางเนื้อเยื่อด้วยวิธีทาง Histology (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.13)
- ลักษณะทางเนื้อเยื่อด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.14)

วางแผนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Asymmetric Factorial Design ขนาด 2 X 5 ทดลอง 2 ซ้ำ วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple range test



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของกึ่งกลาดำสด

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกึ่งกลาดำสด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของกึ่งกลาดำสด

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (%)
ความชื้น	79.75 ± 0.35
โปรตีน	17.70 ± 0.42
ไขมัน	0.86 ± 0.05
เถ้า	0.99 ± 0.01
คาร์โบไฮเดรต	0.70 ± 0.17

จากตารางที่ 4.1 พบว่ากึ่งกลาดำสดมีน้ำเป็นองค์ประกอบหลักโดยมีความชื้นสูงถึง 79.75% มีปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า และคาร์โบไฮเดรต เท่ากับ 17.70% 0.86% 0.99% และ 0.70% ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์จากกองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุขซึ่งพบว่ากึ่งกลาดำสดมีความชื้นสูงถึง 79.2% มีปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า และคาร์โบไฮเดรตเท่ากับ 17.6% 0.9% 1.4% และ 0.9% ตามลำดับ (กองโภชนาการ กรมอนามัย, 2530) ในการทดลองขั้นต่อไปได้ศึกษาสมบัติทางเคมีและกายภาพของกึ่งกลาดำสด ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการแช่เยือกแข็งกึ่งด้วยวิธีแบบลมพ่นและแบบโครโอเจนิค จากนั้นศึกษาผลของวิธีการละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมีและกายภาพของกึ่งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งจากทั้งสองวิธี

4.2 สมบัติทางเคมีและกายภาพของกุ้งกุลาดำสด

จากการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของกุ้งกุลาดำสด ได้ผลดังแสดงในตารางที่

4.2

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางเคมีและกายภาพของกุ้งกุลาดำสด

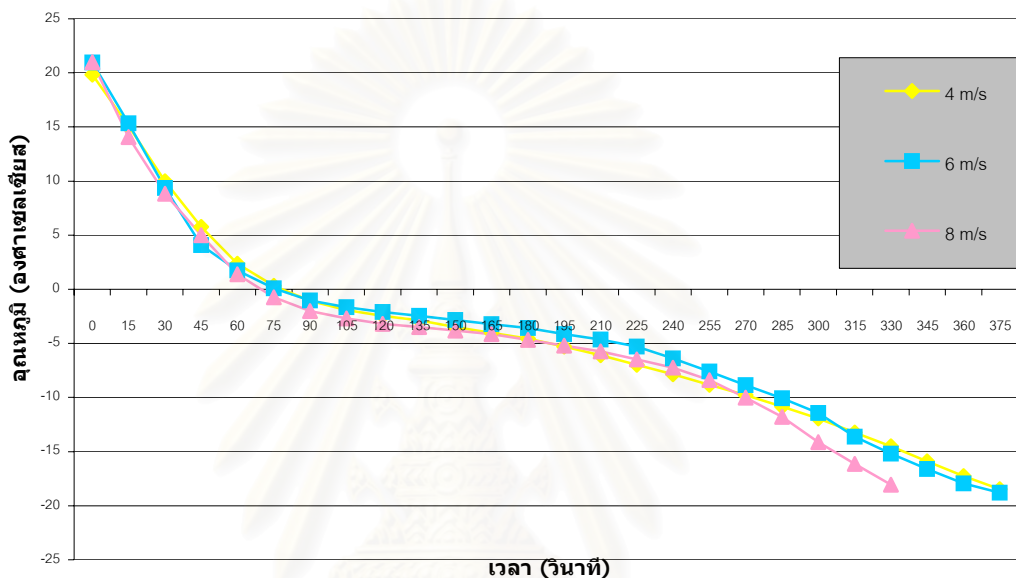
สมบัติทางเคมีและกายภาพ	ค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ค่า thiobarbituric acid number (mg malonaldehyde / 1 kg sample)	0.124 \pm 0.002
ปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้ (mg N / 100 g sample)	10.220 \pm 0.271
ความเป็นกรด-ด่าง	6.76 \pm 0.02
ปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือ (g /100 g sample)	14.41 \pm 0.31
แรงต้านทานการตัดขาด (นิวตัน)	21.57 \pm 0.88

เนื่องจากคุณลักษณะที่ต้องการของผลิตภัณฑ์กุ้งแช่เยือกแข็งตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกุ้งเยือกแข็ง มอก. 115-2529 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2529) ได้กำหนดเกณฑ์ของปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้ไว้ว่าต้องไม่เกิน 30 มิลลิกรัม ไนโตรเจน / ตัวอย่าง 100 กรัม จึงจะถือว่าเป็นคุณลักษณะที่ต้องการ และปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้สามารถใช้เป็นดัชนีบอกความสดของสัตว์น้ำได้ เนื่องจากเป็นการวัด volatile amines ทั้งหมด ที่อาจเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการย่อยสลายโปรตีนของเอนไซม์ที่มีอยู่ในตัวสัตว์น้ำ (นงลักษณ์ สุทธิวินิจ, 2531; Botta, 1994) ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้เป็นเกณฑ์ในการวัดความสดของกุ้งกุลาดำก่อนที่จะนำมาทำการทดลอง กล่าวคือ กุ้งกุลาดำสดที่จะนำมาใช้ทำการทดลองในขั้นต่อไปจะต้องมีปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้อยู่ในช่วง 10.220 \pm 0.271 มิลลิกรัม ไนโตรเจน / ตัวอย่าง 100 กรัม

4.3 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการแช่เยือกแข็งกุ้งกุลาดำด้วยวิธีแบบลมพ่น

4.3.1 การหาเวลาและอัตราเร็วที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งกุ้งกุลาดำด้วยวิธีแบบลมพ่นที่ระดับความเร็วลมต่างๆ

ผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในตัวกุ้งเมื่อเวลาในการแช่เยือกแข็งเปลี่ยนแปลงไปที่ระดับความเร็วลมต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างการแช่เยือกแข็งกุ้งกุลาดำด้วยวิธีแบบลมพ่นที่ระดับความเร็วลมต่างๆ

จากการทดลองพบว่าการแช่เยือกแข็งกุ้งกุลาดำด้วยวิธีแบบลมพ่นที่ระดับความเร็วลมต่างกันคือ 4 6 และ 8 เมตรต่อวินาทีนั้นจะใช้เวลาในการลดอุณหภูมิภายในตัวกุ้งกุลาดำเริ่มต้นที่ 20 องศาเซลเซียส จนถึง -18 องศาเซลเซียสต่างกัน และมีอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งต่างกัน (ภาคผนวก ข.1) ดังแสดงผลในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 เวลาและอัตราเร็วที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งกุ้งกุลาดำด้วยวิธีแบบลมพ่นที่ระดับความเร็วลมต่างๆ

ความเร็วลม (เมตร / วินาที)	เวลาในการ แช่เยือกแข็ง (วินาที)	อัตราเร็วในการ แช่เยือกแข็ง (เซนติเมตร / ชั่วโมง)
4	371.25 ± 7.50	6.85 ^b ± 0.10
6	363.75 ± 7.50	6.90 ^b ± 0.12
8	333.75 ± 7.50	7.42 ^a ± 0.14

a, b ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันแถวเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

จากตารางที่ 4.3 พบว่าที่ความเร็วลม 4 6 และ 8 เมตรต่อวินาที จะใช้เวลาในการแช่เยือกแข็งกุ้งกุลาดำนาน 371.25 363.75 และ 333.75 วินาที ตามลำดับ และเมื่อคิดเป็นอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งพบว่า เป็น 6.85 6.90 และ 7.42 เซนติเมตรต่อชั่วโมงตามลำดับ โดยพบว่า การแช่เยือกแข็งที่ความเร็วลม 4 และ 6 เมตรต่อวินาที มีอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ส่วนที่ความเร็วลม 8 เมตรต่อวินาทีให้อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งเร็วที่สุด เนื่องจากเมื่อระดับความเร็วลมสูงขึ้นจะช่วยลดความหนาของฟิล์มชั้นบางๆ (boundary film) ที่อยู่ล้อมรอบอาหาร ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่บริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นและมีการระบายความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์เร็วขึ้น จึงใช้เวลาในการลดอุณหภูมิของกุ้งกุลาดำจากอุณหภูมิเริ่มต้นจนถึง -18 องศาเซลเซียสที่สั้นลง และส่งผลให้อัตราเร็วที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งเร็วขึ้นด้วย (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, 2535; Karel et al., 1975)

4.3.2 การหาร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นที่ระดับความเร็วลมต่างๆ

ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นที่ระดับความเร็วลมต่างๆ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นที่ระดับความเร็วลมต่างๆ

ความเร็วลม (เมตร / วินาที)	การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็ง (%)
4	2.71 ^b ± 0.30
6	2.14 ^b ± 0.29
8	3.43 ^a ± 0.53

a, b ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันในแถวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Completely Randomized Design (ภาคผนวก ข.2) พบว่า การแช่เยือกแข็งกุ้งกุลาดำด้วยวิธีแบบลมพ่นที่ระดับความเร็วลมต่างๆ มีผลต่อค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยที่ความเร็วลม 4 และ 6 เมตรต่อวินาทีจะมีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งเท่ากับ 2.71% และ 2.14% ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่ที่ความเร็วลม 8 เมตรต่อวินาที ซึ่งน่าจะมีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งน้อยที่สุดนั้นกลับพบว่ามีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งสูงที่สุดคือ 3.43% และยังมีแตกต่างจากระดับความเร็วลม 4 และ 6 เมตรต่อวินาที เนื่องจากอาจเป็นระดับความเร็วลมที่เร็วเกินไปจนทำให้มีการสูญเสียน้ำหนักออกไปจากผลิตภัณฑ์ได้มาก โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีการบรรจุในภาชนะก่อนนำไปแช่เยือกแข็ง (ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาสิก, 2532; Karel et al., 1975)

4.3.3 การวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นที่ระดับความเร็วลมต่างๆ

ผลการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของกุ้งกุลาดำในรูปของค่าแรงต้านทานการตัดขาด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าแรงต้านทานการตัดขาดของกึ่งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบ
ลมพ่นที่ระดับความเร็วลมต่างๆ เปรียบเทียบกับกึ่งกุลาดำสด

ความเร็วลม (เมตร / วินาที)	แรงต้านทานการตัดขาด (นิวตัน)
4	19.29 ^c ± 0.36
6	21.36 ^b ± 0.17
8	22.49 ^a ± 0.30
กึ่งกุลาดำสด	21.57 ^b ± 0.88

a, b, c ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันในแถวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

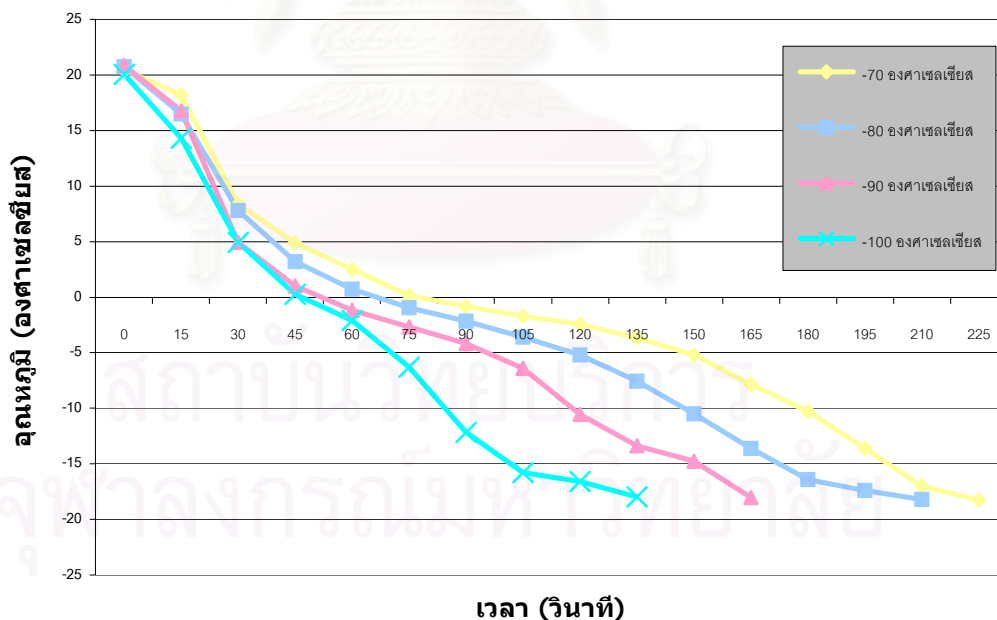
จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Completely Randomized Design (ภาคผนวก
ข.3) พบว่าค่าแรงต้านทานการตัดขาดของกึ่งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นที่
ระดับความเร็วลมต่างๆ นั้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อความเร็ว
ลมที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งสูงขึ้นจะทำให้กึ่งกุลาดำมีค่าแรงต้านทานการตัดขาดสูงขึ้นด้วย โดยการแช่
เยือกแข็งกึ่งกุลาดำด้วยวิธีแบบลมพ่นที่ความเร็วลม 4 6 และ 8 เมตรต่อวินาทีจะทำให้กึ่งกุลาดำที่ผ่าน
การละลายน้ำแข็งแล้วมีค่าแรงต้านทานการตัดขาดเป็น 19.29 21.36 และ 22.49 นิวตัน
ตามลำดับ การแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นที่ความเร็วลม 4 เมตรต่อวินาที ทำให้กึ่งกุลาดำมีค่าแรง
ต้านทานการตัดขาดน้อยที่สุด และการแช่เยือกแข็งที่ความเร็วลม 8 เมตรต่อวินาที ทำให้กึ่งกุลาดำมี
ค่าแรงต้านทานการตัดขาดสูงที่สุด เนื่องจากการใช้ความเร็วลมที่สูงขึ้นจะทำให้อัตราเร็วในการ
แช่เยือกแข็งเร็วขึ้น ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดเล็ก และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอจึงไม่ทำให้
เซลล์เกิดการหดตัว (Fennema et al., 1973) เมื่อนำมาละลายน้ำแข็งจึงไม่สูญเสียน้ำมาก เซลล์จึง
ยังคงมีความเต่งตึงสูง ดังนั้นเมื่อนำมาวัดลักษณะเนื้อสัมผัสในรูปของแรงต้านทานการตัดขาดจึงมี
ค่าแรงต้านทานการตัดขาดที่สูง (Anzaldua-Morales, Bruswitz, and Anderson, 1999)
นอกจากนี้การแช่เยือกแข็งที่ความเร็วลม 8 เมตรต่อวินาที อาจจะเป็นระดับความเร็วลมที่เร็ว
เกินไปจนทำให้กึ่งกุลาดำสูญเสียน้ำบริเวณผิวหนังไปได้มากและทำให้แรงต้านทานการตัดขาดสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาที่ค่าแรงต้านทานการตัดขาดจะสามารถเลือกภาวะการแช่เยือกแข็งกึ่ง
 กูลาดำด้วยวิธีแบบลมพ่นที่ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที เนื่องจากให้ค่าแรงต้านทานการตัดขาด
 ใกล้เคียงกับกึ่งกูลาดำสศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) และถ้าพิจารณาค่าร้อยละการ
 สูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งร่วมด้วยพบว่าที่ความเร็วลม 8 เมตรต่อวินาทีนั้นทำให้กึ่ง
 มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งสูงที่สุด ส่วนที่ความเร็วลม 6 เมตรต่อ
 วินาทีนั้นจะทำให้กึ่งมีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งน้อยกว่าและไม่
 แตกต่างจากที่ความเร็วลม 4 เมตรต่อวินาที ดังนั้นจึงเลือกภาวะการแช่เยือกแข็งกึ่งกูลาดำด้วย
 วิธีแบบลมพ่นที่ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาทีเพื่อใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

4.4 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการแช่เยือกแข็งกึ่งกูลาดำด้วยวิธีแบบโครโอจีนิก

4.4.1 การหาเวลาและอัตราเร็วที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งกึ่งกูลาดำด้วยวิธีแบบโครโอจีนิก
 ที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

ผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในตัวกึ่งเมื่อเวลาในการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจีนิก
 เปลี่ยนแปลงไปที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างการแช่เยือกแข็ง
 กึ่งกูลาดำด้วยวิธีแบบโครโอจีนิกที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

จากการทดลองพบว่า การแช่เยือกแข็งกึ่งกลาดำด้วยวิธีแบบโครโอจินิคที่ระดับอุณหภูมิต่างกันคือ -70 -80 -90 และ -100 องศาเซลเซียสนั้น จะใช้เวลาในการลดอุณหภูมิภายในตัวกึ่งกลาดำ เริ่มต้นที่ 20 องศาเซลเซียส จนถึง -18 องศาเซลเซียสต่างกัน และมีอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งต่างกัน (ภาคผนวก ข. 4) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 เวลาและอัตราเร็วที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งกึ่งกลาดำด้วยวิธีแบบโครโอจินิคที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการแช่เยือกแข็ง (วินาที)	อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็ง (เซนติเมตร / ชั่วโมง)
-70	213.75 ± 14.36	11.82 ^c ± 0.79
-80	191.25 ± 14.36	13.26 ^c ± 0.93
-90	153.75 ± 14.36	16.25 ^b ± 1.29
-100	116.25 ± 14.36	21.98 ^a ± 2.74

a, b, c ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันแถวเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

จากตารางที่ 4.6 พบว่าการแช่เยือกแข็งกึ่งกลาดำด้วยวิธีแบบโครโอจินิคที่อุณหภูมิต่างกันคือ -70 -80 -90 และ -100 องศาเซลเซียสนั้น จะใช้เวลาในการลดอุณหภูมิภายในตัวกึ่งกลาดำจากเริ่มต้นที่ 20 องศาเซลเซียส จนถึง -18 องศาเซลเซียสต่างกัน เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งต่ำลงจะทำให้ใช้เวลาในการแช่เยือกแข็งกึ่งน้อยลง โดยที่อุณหภูมิ -70 -80 -90 และ -100 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแช่เยือกแข็งนาน 213.75 191.25 153.75 และ 116.25 วินาทีตามลำดับ และให้อัตราเร็วที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งเร็วขึ้นด้วย คือ 11.82 13.26 16.25 และ 21.98 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ และพบว่าที่อุณหภูมิ -70 และ -80 องศาเซลเซียสให้อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่มีความแตกต่างจากการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -90 และ -100 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิ -100 องศาเซลเซียสจะใช้เวลาในการแช่เยือกแข็งสั้นที่สุดและมีอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งเร็วที่สุด รองลงมาได้แก่ที่ระดับอุณหภูมิ -90 -80 และ -70 องศาเซลเซียสตามลำดับ เนื่องจากเมื่อใช้ระดับอุณหภูมิต่ำลงจะทำให้ช่วยเพิ่มแรงขับ (driving force) ในการระบายความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้น ทำให้เวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งนั้นสั้นลง จึงส่งผลให้อัตราเร็วที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งเร็วขึ้นด้วย (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, 2535)

4.4.2 การหำร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (° C)	การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็ง (%) ^{ns}
- 70	1.83 ± 0.01
- 80	1.81 ± 0.00
- 90	1.75 ± 0.01
-100	1.75 ± 0.13

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Completely Randomized Design (ภาคผนวก ข.5) พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งต่างกันนั้นไม่มีผลต่อค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ดังนั้นจึงพิจารณาจากค่าแรงต้านทานการตัดขาดร่วมด้วย

4.4.2 การวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

ผลการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของกุ้งกุลาดำในรูปของค่าแรงต้านทานการตัดขาดแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าแรงต้านทานการตัดขาดของกึ่งกลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ เปรียบเทียบกับกึ่งกลาดำสด

อุณหภูมิ (° C)	แรงต้านทานการตัดขาด (นิวตัน)
- 70	22.45 ^{bc} ± 0.86
- 80	22.77 ^b ± 0.61
- 90	23.78 ^a ± 0.37
- 100	18.56 ^d ± 0.14
กึ่งกลาดำสด	21.57 ^c ± 0.88

a, b, c, d ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันแถวเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p ≤ 0.05)

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Completely Randomized Design (ภาคผนวก ข.6) พบว่าค่าแรงต้านทานการตัดขาดของกึ่งกลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ นั้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p ≤ 0.05) เมื่ออุณหภูมิในการแช่เยือกแข็งต่ำลงจะทำให้กึ่งมีค่าแรงต้านทานการตัดขาดสูงขึ้น โดยการแช่เยือกแข็งกึ่งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคที่ระดับอุณหภูมิ -70 -80 และ -90 องศาเซลเซียสจะทำให้กึ่งที่ละลายน้ำแข็งแล้วมีค่าแรงต้านทานการตัดขาดเป็น 22.45 22.77 และ 23.78 นิวตัน ตามลำดับ เนื่องจากการใช้ระดับอุณหภูมิที่ต่ำลงจะทำให้อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งเร็วขึ้น ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดเล็ก และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอจึงไม่ทำให้เซลล์หดตัว (Fennema et al., 1973) เมื่อนำมาละลายน้ำแข็งจึงไม่สูญเสียน้ำมาก เซลล์จึงยังคงมีความเต่งตึงสูง ดังนั้นเมื่อนำมาวัดลักษณะเนื้อสัมผัสในรูปของแรงต้านทานการตัดขาดจึงมีค่าแรงต้านทานการตัดขาดที่สูง (Anzaldua-Morales et al., 1999) ยกเว้นที่ระดับอุณหภูมิ -100 องศาเซลเซียสซึ่งมีค่าแรงต้านทานการตัดขาด 18.56 นิวตัน ซึ่งต่ำกว่าที่ระดับอุณหภูมิ -90 องศาเซลเซียสเนื่องจากที่ระดับอุณหภูมิ -100 องศาเซลเซียสนั้นตัวอย่างอาจเกิดการแตกหัก (cracking) และฉีกขาดของเนื้อเยื่อ จึงทำให้กึ่งมีค่าแรงต้านทานการตัดขาดที่ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่น้ำเปลี่ยนสถานะกลายเป็นน้ำแข็งอย่างรวดเร็วทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นและมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรอย่างรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pan และ Yeh (1993) ที่พบว่า การแช่เยือกแข็งกึ่งกลาดำที่ระดับอุณหภูมิ -120 องศาเซลเซียสจะทำให้เซลล์เนื้อเยื่อบริเวณพื้นผิวของกึ่งแตกถึงร้อยละ 50

เมื่อพิจารณาค่าแรงต้านทานการตัดขาด พบว่าการแช่เยือกแข็งกุ้งกุลาดำที่ระดับอุณหภูมิ -70 องศาเซลเซียส จะทำให้กุ้งที่ละลายน้ำแข็งแล้วมีค่าแรงต้านทานการตัดขาดไม่แตกต่างกับกุ้งกุลาดำสดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) และเมื่อพิจารณาค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการแช่เยือกแข็งร่วมด้วยพบว่าทุกระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งให้ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) นอกจากนี้การแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -70 องศาเซลเซียสยังเป็นการประหยัดพลังงานอีกด้วย ดังนั้นจึงเลือกภาวะการแช่เยือกแข็งกุ้งกุลาดำด้วยวิธีแบบโครโอจินิคที่อุณหภูมิ -70 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

4.5 การศึกษาผลของวิธีการละลายน้ำแข็ง และการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมีและกายภาพของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง ด้วยวิธีแบบลมนตามภาวะที่คัดเลือกแล้วในข้อ 4.3 และแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วในข้อ 4.4

การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งอาจเกิดขึ้นซ้ำกันหลายๆครั้งได้ในระหว่างการขนส่ง ในตู้แช่แข็งตามร้านค้าขายปลีก ร้านอาหาร ในครัวเรือน หรือแม้แต่โรงงานที่รับวัตถุดิบในรูปผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งมาแล้ว ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งในด้านต่างๆ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมีและกายภาพในด้านค่า TBA ปริมาณด่างทั้งหมดที่ระเหยได้ ความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือ ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็ง และแรงต้านทานการตัดขาดของกุ้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมนและแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้ว ผลการวิเคราะห์พบว่ากุ้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งจากทั้งสองวิธีจะมีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพไปในทิศทางเดียวกันจึงได้อธิบายการเปลี่ยนแปลงในแต่ละด้านไปพร้อมกัน

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมีและกายภาพของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมนตามภาวะที่คัดเลือกแล้วในข้อ 4.3 และแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วในข้อ 4.4 แสดงในตารางที่ 4.9 - 4.26 ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Asymmetric Factorial Design (ภาคผนวก ข.7 และ ข.8) พบว่าวิธีการละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำมีผลต่อค่า TBA อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) โดยอิทธิพลร่วมระหว่างวิธีการละลายน้ำแข็งกับการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำไม่มีผลต่อค่า TBA ในทั้งสองวิธีของการแช่เยือกแข็ง ($p>0.05$) ดังนั้นใน

การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจึงแยกพิจารณาในแต่ละปัจจัยโดยจะพิจารณาแยกอิทธิพลของวิธีการละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ ดังแสดงในตารางที่ 4.9-4.10

ตารางที่ 4.9 ค่า TBA ของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วว่าวิธีละลายน้ำแข็งและจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ

วิธีละลายน้ำแข็ง	ค่า TBA (mg malonaldehyde / 1 kg sample) ของกุ้งที่ผ่านจำนวน Freeze-thaw cycles ครั้งที่				
	0	1	2	3	4
ไมโครเวฟ	dx 0.210 ± 0.002	cx 0.244 ± 0.006	bx 0.300 ± 0.005	ax 0.378 ± 0.000	ax 0.391 ± 0.013
ตู้เย็น	dy 0.202 ± 0.004	cy 0.227 ± 0.013	by 0.262 ± 0.047	ay 0.359 ± 0.013	ay 0.387 ± 0.004

a,b,c,d ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันในแถวบนเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

x,y ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันในแถวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.10 ค่า TBA ของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วว่าวิธีละลายน้ำแข็งและจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ

วิธีละลายน้ำแข็ง	ค่า TBA (mg malonaldehyde / 1 kg sample) ของกุ้งที่ผ่านจำนวน Freeze-thaw cycles ครั้งที่				
	0	1	2	3	4
ไมโครเวฟ	cx 0.170 ± 0.015	cx 0.178 ± 0.008	bx 0.232 ± 0.023	bx 0.234 ± 0.021	ax 0.337 ± 0.027
ตู้เย็น	cy 0.116 ± 0.001	cy 0.128 ± 0.004	by 0.173 ± 0.016	by 0.214 ± 0.008	ay 0.334 ± 0.028

a,b,c ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันในแถวบนเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

x,y ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันในแถวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาวิธีการละลายน้ำแข็งพบว่า การละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟจะทำให้กึ่งมีค่า TBA มากกว่าวิธีการละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิตู้เย็นในทุกๆ ครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ เนื่องจากการละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟเป็นการอาศัยความร้อนที่เกิดขึ้นจากช่วงความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่ออาหารดูดซับคลื่นไมโครเวฟก็จะก่อให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้น (สายสนม ประดิษฐ์ดวง, 2539) ซึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันสามารถเกิดขึ้นที่ระดับอุณหภูมิสูง ถึงแม้ว่าการให้ความร้อนจะเป็นวิธีที่สามารถลดการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ เนื่องจากเอนไซม์ได้ในระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งก็ตาม นอกจากนี้ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยยังขึ้นอยู่กับระดับความรุนแรงของการให้ความร้อนอีกด้วย จากงานวิจัยที่มีการวิเคราะห์ปริมาณมาโลนาลดีไฮด์ (malonaldehyde) ในผลิตภัณฑ์เนื้อพบว่า ตัวอย่างเนื้อสดประมาณร้อยละ 38 จะมีปริมาณมาโลนาลดีไฮด์น้อยกว่า 1 ไมโครกรัม / ตัวอย่าง 1 กรัม ในขณะที่ประมาณร้อยละ 60 ของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการให้ความร้อนจะมีปริมาณมาโลนาลดีไฮด์อยู่ในช่วง 1-6 ไมโครกรัม / ตัวอย่าง 1 กรัม (Siu and Draper, 1978)

เมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ พบว่าเมื่อจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้กึ่งมีค่า TBA เพิ่มขึ้นในทั้งสองวิธีการละลายน้ำแข็ง เนื่องจากเมื่อกึ่งผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดการละลายของผลึกน้ำแข็งเมื่อนำไปละลาย และเกิดการรวมตัวกันสร้างผลึกน้ำแข็งอีกเมื่อนำไปแช่เยือกแข็ง ซึ่งจะเกิดผลเสียต่อเนื้อเยื่อ เกิดการเสื่อมสลายทางกล (mechanical damage) ของ cell membrane และ organelles จึงทำให้เกิดการปลดปล่อย oxidative enzyme และ prooxidant ออกจาก cellular organelles (Srinivasan, Xiong, Blanchard, and Tidwell, 1997) นอกจากนี้กึ่งยังมีสารยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน (antioxidant) อยู่บริเวณเปลือก ดังนั้นการแกะเปลือกออกไปจึงเป็นผลให้อาจเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายขึ้น (Srinivasan et al., 1998)

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Asymmetric Factorial Design (ภาคผนวก ข. 9 และ ข.10) พบว่าวิธีการละลายน้ำแข็ง การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำและอิทธิพลร่วมของวิธีการละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำมีผลต่อปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้ในทั้งสองวิธีการแช่เยือกแข็งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยพบว่า การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำมีผลต่อปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้อย่างมาก ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยผลของวิธีการละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.11-4.12

ตารางที่ 4.11 ปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้ของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบ
ลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วที่วิธีละลายน้ำแข็งและจำนวนครั้งของการแช่
เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ

วิธีละลายน้ำแข็ง	Freeze-thaw cycles	ปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้ (mg N/100 g sample)
ไม่โครเวฟ	0	10.682 ^f ± 0.098
	1	11.028 ^e ± 0.003
	2	12.141 ^d ± 0.185
	3	13.360 ^c ± 0.170
	4	14.946 ^a ± 0.051
ตู้เย็น	0	10.832 ^{ef} ± 0.044
	1	10.912 ^{ef} ± 0.001
	2	12.300 ^d ± 0.226
	3	14.166 ^b ± 0.121
	4	14.812 ^a ± 0.096

a, b,f ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันแถวเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.12 ปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้ของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วที่วิธีละลายน้ำแข็งและจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ

วิธีละลายน้ำแข็ง	Freeze-thaw cycles	ปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้ (mg N/100 g sample)
ไมโครเวฟ	0	10.209 ^g ± 0.079
	1	10.828 ^f ± 0.044
	2	11.562 ^e ± 0.099
	3	13.540 ^c ± 0.122
	4	14.612 ^a ± 0.083
ตู้เย็น	0	10.253 ^g ± 0.027
	1	10.936 ^f ± 0.056
	2	10.802 ^f ± 0.097
	3	12.744 ^d ± 0.035
	4	14.132 ^b ± 0.108

a, b,, g ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันแถวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

หลังจากที่สัตว์น้ำตายจะมีการเปลี่ยนแปลงสภาพทางชีวเคมีโดยสาเหตุมาจากแบคทีเรีย ซึ่งจะสร้างเอนไซม์ออกมาย่อยสลายโปรตีนในกล้ามเนื้อ นอกจากนี้เอนไซม์ที่มีอยู่ในตัวสัตว์น้ำเอง ก็เป็นสาเหตุทำให้เกิดการย่อยสลายโปรตีนเช่นกัน ทำให้เกิดเป็นสารประกอบที่ระเหยได้ เช่น TMA DMA แอมโมเนีย และ volatile acids การเกิด TMA มีสาเหตุมาจากการสลายตัวของ TMAO ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีแอมโมเนียเป็นองค์ประกอบสำคัญ ส่วนปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้จะรวมไปถึง volatile amines ทั้งหมดได้แก่ TMA DMA และแอมโมเนียที่เกิดจากการแตกตัวของ adenosine monophosphate (AMP) เป็น inosine monophosphate (IMP) ระดับของปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้จะเพิ่มขึ้นหลังจากสัตว์น้ำเกิดการเน่าเสีย เนื่องจากวิธีการหาปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้ไม่ได้แยกสารต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบ ดังนั้นจึงนิยมใช้ทั่วไป ปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้สามารถใช้เป็นดัชนีบอกความสดของสัตว์น้ำได้ เช่น ปลาที่มีปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้ ต่ำกว่า 20 มิลลิกรัม ไนโตรเจน / ตัวอย่าง 100 กรัม ถือว่ามีความสดมาก

ปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้ ที่เกินกว่า 30 มิลลิกรัม ไนโตรเจน / ตัวอย่าง 100 กรัม จะเริ่มไม่สด และถ้ามีค่าถึง 40 มิลลิกรัม ไนโตรเจน / ตัวอย่าง 100 กรัม จัดเป็นคุณภาพที่ไม่เหมาะสมต่อการบริโภค (ปรียา วิบูลย์เศรษฐ์, 2538 ; Botta, 1994)

เมื่อผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำหลายๆ ครั้งพบว่าปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นในทั้งสองวิธีของการละลายน้ำแข็งซึ่งหมายถึงกึ่งมีความสดที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำหลายๆ ครั้งเป็นผลให้อุณหภูมิในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์นั้นไม่คงที่ ซึ่งอิทธิพลของอุณหภูมินั้นจะมีผลต่อจุลินทรีย์ การแปรปรวนของอุณหภูมิระหว่างกระบวนการผลิตและการเก็บรักษามักก่อให้เกิดความเสียหายต่ออายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ ในระหว่างนี้อาจเกิดการเพิ่มปริมาณของแบคทีเรียชนิดที่ทำให้เกิดการเน่าเสีย แบคทีเรียในอาหารทะเลสามารถย่อยสลายโปรตีนได้ดี ภายหลังจากการย่อยสลายจะเกิดสารประเภทแอมโมเนีย อินโดล เอมีน หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทำให้เกิดกลิ่นไม่ดีในอาหารนั้นๆ ปริมาณแอมโมเนียเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์หลายชนิดที่สามารถย่อยโปรตีนและสามารถใช้เป็นตัวชี้แสดงถึงคุณภาพของอาหารทะเล อาหารทะเลที่เน่าเสียจะมีปริมาณแอมโมเนียเพิ่มขึ้น (นงลักษณ์ สุทธิวิเศษ, 2531) อย่างไรก็ตามจากการทดลองพบว่าปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้ที่สูงขึ้นเมื่อกึ่งผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำหลายๆ ครั้งนั้นก็ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนด คือไม่เกิน 30 มิลลิกรัม ไนโตรเจน / น้ำหนักเนื้อ 100 กรัม (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2529) เนื่องจากตัวอย่างที่ใช้เป็นกึ่งที่ผ่านการเด็ดหัวแล้ว ซึ่งจะมีปริมาณแบคทีเรียตกค้างน้อยกว่ากึ่งที่ไม่ได้ผ่านการเด็ดหัว

ผลการทดลองดังกล่าวใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Verma และ Srikar (1994) ที่พบว่าในระหว่างการเก็บรักษาปลา Pink Perch บดแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส นาน 6 เดือน ปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้ที่ตรวจพบในระหว่างการเก็บรักษาจะเพิ่มขึ้นจาก 8.53 มิลลิกรัม ไนโตรเจน / ตัวอย่าง 100 กรัม ในวันแรกของการเก็บรักษา เป็น 22.75 มิลลิกรัม ไนโตรเจน / ตัวอย่าง 100 กรัม หลังจากเก็บรักษานาน 6 เดือน

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Asymmetric Factorial Design (ภาคผนวก ข.11 และ ข.12) พบว่ามีเพียงการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำที่มีผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่างในทั้งสองวิธีของการแช่เยือกแข็งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.13 - 4.14 ดังนั้นในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจึงพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ ดังแสดงในตารางที่ 4.15 - 4.16

ตารางที่ 4.13 ค่าความเป็นกรด-ด่างของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบ
ลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วที่วิธีละลายน้ำแข็งและจำนวนครั้งของ
การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ

วิธีละลายน้ำแข็ง	Freeze-thaw cycles	ความเป็นกรด-ด่าง
ไมโครเวฟ	0	6.93 ± 0.03
	1	6.82 ± 0.13
	2	6.97 ± 0.01
	3	7.00 ± 0.03
	4	7.06 ± 0.01
ตู้เย็น	0	6.94 ± 0.02
	1	6.96 ± 0.20
	2	7.04 ± 0.08
	3	7.02 ± 0.04
	4	7.16 ± 0.06

ตารางที่ 4.14 ค่าความเป็นกรด-ด่างของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบ
โครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วที่วิธีละลายน้ำแข็งและจำนวนครั้งของ
การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ

วิธีละลายน้ำแข็ง	Freeze-thaw Cycles	ความเป็นกรด-ด่าง
ไม่โครเวฟ	0	6.76 ± 0.02
	1	6.88 ± 0.01
	2	6.86 ± 0.12
	3	6.92 ± 0.09
	4	7.00 ± 0.01
ตู้เย็น	0	6.82 ± 0.11
	1	6.88 ± 0.02
	2	6.92 ± 0.06
	3	6.92 ± 0.10
	4	6.96 ± 0.05

ตารางที่ 4.15 ค่าความเป็นกรด-ด่างของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบ
ลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเมื่อพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของ
การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ

Freeze – thaw cycles	ความเป็นกรด-ด่าง
0	6.93 ^b ± 0.02
1	6.89 ^b ± 0.16
2	7.00 ^{ab} ± 0.06
3	7.01 ^{ab} ± 0.03
4	7.11 ^a ± 0.07

a, b ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันในแถวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ
($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.16 ค่าความเป็นกรด-ด่างของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธี
แบบโครโอจีนิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเมื่อพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของ
การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ

Freeze – thaw cycles	ความเป็นกรด-ด่าง
0	6.79 ^b ± 0.08
1	6.88 ^{ab} ± 0.01
2	6.89 ^{ab} ± 0.08
3	6.92 ^a ± 0.08
4	6.98 ^a ± 0.04

a, b ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันในแถวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ
($p \leq 0.05$)

เมื่อการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้กึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้น คือมีค่าความเป็นด่างเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณด่างทั้งหมดที่ระเหยได้ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเป็นกรด-ด่างของสภาวะแวดล้อมมีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย โดยเฉพาะแบคทีเรียชนิดที่ก่อให้เกิดความเน่าเสียสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่ระดับ pH 6-8 ระดับ pH ที่สูงจะทำให้เกิดการเน่าเสียได้มาก เมื่อแบคทีเรียสามารถย่อยสลายโปรตีนในตัวอย่างจะทำให้เกิดสารพวกแอมโมเนียเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสารประเภทด่าง ดังนั้นจึงวัดค่า pH และ ปริมาณด่างทั้งหมดที่ระเหยได้ได้สูงขึ้น (นงลักษณ์ สุทธิวิช, 2531) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bhohe และ Pai (1986) ที่พบว่ากึ่งแช่เยือกแข็งที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส จะมีค่า pH ที่เพิ่มขึ้นในระยะเวลาการเก็บรักษานาน 15 สัปดาห์ จาก 6.86 เป็น 9.50 และกึ่งแช่เยือกแข็งที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส จะมีค่า pH ที่เพิ่มขึ้นในระยะเวลาการเก็บรักษานาน 180 สัปดาห์ จาก 6.84 เป็น 7.40

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Asymmetric Factorial Design (ภาคผนวก ข. 13 และ ข.14) พบว่ามีเพียงการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำที่มีผลต่อปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลืออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.17-4.18 ดังนั้นในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจึงพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ ดังแสดงในตารางที่ 4.19-4.20

ตารางที่ 4.17 ปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วที่วิธีละลายน้ำแข็งและจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ

วิธีละลายน้ำแข็ง	Freeze-thaw cycles	ปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือ (กรัม / ตัวอย่าง 100 กรัม)
ไมโครเวฟ	0	11.67 ± 0.11
	1	12.10 ± 0.05
	2	11.64 ± 1.00
	3	10.15 ± 0.11
	4	10.58 ± 0.48
ตู้เย็น	0	11.69 ± 0.08
	1	11.39 ± 1.46
	2	12.28 ± 0.40
	3	10.38 ± 0.21
	4	9.94 ± 0.03

ตารางที่ 4.18 ปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบไปครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วที่วิธีละลายน้ำแข็งและจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ

วิธีละลายน้ำแข็ง	Freeze-thaw cycles	ปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือ (กรัม / ตัวอย่าง 100 กรัม)
ไม่โครเวฟ	0	14.10 ± 0.93
	1	13.41 ± 0.30
	2	13.41 ± 0.66
	3	12.50 ± 1.06
	4	12.34 ± 0.76
ตู้เย็น	0	14.03 ± 0.04
	1	13.28 ± 0.57
	2	12.94 ± 0.44
	3	11.88 ± 0.71
	4	10.88 ± 0.97

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.19 ปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเมื่อพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ

Freeze – thaw cycles	ปริมาณโปรตีนที่ละลายใน สารละลายเกลือ (กรัม / ตัวอย่าง 100 กรัม)
0	11.68 ^a ± 0.08
1	11.74 ^a ± 0.93
2	11.96 ^a ± 0.72
3	10.26 ^b ± 0.19
4	10.26 ^b ± 0.46

a, b ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันในแถวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.20 ปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจีนิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเมื่อพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ

Freeze – thaw cycles	ปริมาณโปรตีนที่ละลายใน สารละลายเกลือ (กรัม / ตัวอย่าง 100 กรัม)
0	14.06 ^a ± 0.54
1	13.34 ^{ab} ± 0.38
2	13.17 ^{ab} ± 0.54
3	12.19 ^{bc} ± 0.82
4	11.61 ^c ± 1.11

a, b, c ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันในแถวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ พบว่าเมื่อจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือลดลง เนื่องจากเมื่อเกิดการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้เนื้อเยื่อเกิดการเสื่อมสลาย โปรตีนจะสูญเสียสภาพทางธรรมชาติ เมื่อโมเลกุลของโปรตีนเกิดการคลายตัวบางส่วนจะทำให้โปรตีนสูญเสียสมบัติต่างๆไป (Wagner and Anon, 1985) รวมถึงสมบัติในการละลายได้ของโปรตีนในกลุ่ม myosin ซึ่งคือกลุ่มโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือ (myofibrillar protein) ที่มีอยู่ถึง 65-75% ของโปรตีนทั้งหมด (วรรณวิบูลย์ กาญจนกฤษ, 2539) นอกจากนี้ปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือนั้นอาจลดลงเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาร่วมกันระหว่างกรดไขมันอิสระและโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือ (Verma and Srikar, 1994) ผลการทดลองยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jiang และคณะ (1991) ที่พบว่าปริมาณ actomyosin ที่สกัดได้จากกุ้งกุลาดำแช่เยือกแข็งในระหว่างการเก็บรักษาจะลดลงเนื่องจาก myosin เปลี่ยนแปลงสภาพทางธรรมชาติโดยจะรวมตัวกันทำให้มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้นและไม่สามารถละลายได้ในสารละลายเกลือ นอกจากนี้กุ้งกุลาดำยังมี myofibrillar protein อื่นที่ไม่มีความเสถียรต่อการแช่เยือกแข็งและการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำอีกด้วย

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Asymmetric Factorial Design (ภาคผนวก ข.15 และ ข.16) พบว่าวิธีการละลายน้ำแข็ง การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ และอิทธิพลร่วมของวิธีการละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ มีผลต่อค่าร้อยละการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็งของกุ้งกุลาดำในทั้งสองวิธีของการแช่เยือกแข็งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยพบว่าวิธีการละลายน้ำแข็ง การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำมีผลอย่างมากต่อค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็ง ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของวิธีการละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.21-4.22

ตารางที่ 4.21 ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็งของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วที่วิธีละลายน้ำแข็งและจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ

วิธีละลายน้ำแข็ง	Freeze-thaw cycles	การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็ง (%)
ไม่โครเวฟ	0	2.18 ^f ± 0.03
	1	2.21 ^f ± 0.03
	2	6.65 ^c ± 0.16
	3	7.80 ^b ± 0.03
	4	8.78 ^a ± 0.00
ตู้เย็น	0	1.61 ^g ± 0.11
	1	1.64 ^g ± 0.11
	2	3.35 ^e ± 0.13
	3	5.57 ^d ± 0.10
	4	6.81 ^c ± 0.05

a, b,, g ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันในแถวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.22 ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็งของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วว่าวิธีละลายน้ำแข็งและจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ

วิธีละลายน้ำแข็ง	Freeze-thaw cycles	การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็ง (%)
ไมโครเวฟ	0	0.70 ^g ± 0.01
	1	1.26 ^e ± 0.01
	2	1.77 ^d ± 0.01
	3	2.65 ^b ± 0.24
	4	4.84 ^a ± 0.06
ตู้เย็น	0	0.15 ⁱ ± 0.01
	1	0.36 ^h ± 0.04
	2	0.93 ^f ± 0.04
	3	1.29 ^e ± 0.06
	4	1.99 ^c ± 0.13

a, b,..... i ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันในแถวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณากึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำในจำนวนครั้งที่เท่ากัน พบว่ากึ่งที่ผ่านการละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟจะมีแนวโน้มของค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็งสูงกว่ากึ่งที่ผ่านการละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิตู้เย็นในทุกๆ ครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ ทั้งนี้เพราะวิธีการละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟจะให้พลังงานความร้อนสูงทำให้กึ่งเกิดการสูญเสียน้ำมากกว่า และมีปริมาณน้ำที่ไหลออกมานอกเซลล์ (drip) มากกว่าการละลายน้ำแข็งในอุณหภูมิตู้เย็น เนื่องจากการใช้ไมโครเวฟเป็นการใช้พลังงานที่เกิดจากการแผ่ของแถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง เมื่อคลื่นไมโครเวฟถูกดูดซับเข้าสู่ชิ้นอาหาร จะเกิดความร้อนและกระจายตัวออกไปเนื่องจากผลการเดือดของน้ำโดยการนำความร้อนและเป็นไปอย่างต่อเนื่อง (สายสนม ประดิษฐดวง, 2539) เนื่องจากอาหารแช่เยือกแข็งจะไม่เป็นเนื้อเดียวกันแต่จะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นน้ำแข็ง และส่วนที่ไม่เป็นน้ำแข็ง นอกจากนี้การกระจายตัวของไขมันยังไม่เป็นรูปแบบเดียวกัน องค์ประกอบที่มีความแตกต่างกันนี้จะทำให้

ความสามารถในการดูดซับพลังงานจากคลื่นความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า (radiofrequency energy) ต่างกัน และมีแนวโน้มที่จะเป็นสาเหตุให้บางบริเวณของอาหารได้รับความร้อนมากเกินไปก่อนที่บริเวณอื่นๆ จะละลาย (Karel et al., 1975)

การละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิห้องมีผลให้ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็งต่ำกว่ากึ่งที่ผ่านการละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟในทุกๆ ครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำนั้นอาจจะเป็นไปได้ว่าวิธีละลายน้ำแข็งที่มีอัตราการละลายช้าจะเหมาะสมกว่า เนื่องจากการละลายน้ำแข็งที่ช้าจะทำให้มีเวลาที่น้ำจะแพร่กลับไปสู่ตำแหน่งเดิมในเนื้อเยื่อได้ (Jul, 1984)

ดังนั้นจะเห็นว่าการละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟถึงแม้ว่าจะเป็นวิธีที่เร็ว แต่อาจไม่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์บางประเภท เช่น กุ้ง เนื่องจากกุ้งมีรูปร่างที่ไม่สมมาตร จึงทำให้กุ้งได้รับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟไม่สม่ำเสมอและไม่ทั่วเท่ากันทั้งชิ้นผลิตภัณฑ์ กุ้งบางส่วนอาจได้รับความร้อนมากเกินไปจึงเกิดการสุกเป็นบางส่วน (Srinivasan, Xiong, and Blanchard, 1997)

จากตารางที่ 4.21 และ 4.22 จะเห็นว่าเมื่อจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้กุ้งมีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็งสูงขึ้นทั้งสองวิธีของการละลายน้ำแข็ง เนื่องจากการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำทำให้เนื้อเยื่อเกิดการเสื่อมสลายทางกล จึงไม่สามารถอุ้มน้ำไว้ได้มากและเป็นผลร่วมกับการสูญเสียสภาพทางธรรมชาติของโปรตีนทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงจึงสูญเสียน้ำจากเซลล์มากเมื่อนำไปละลายน้ำแข็ง (Srinivasan, Xiong, Blanchard, and Tidwell, 1997)

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Asymmetric Factorial Design (ภาคผนวก ข.17 และ ข.18) พบว่ามีเพียงการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำที่มีผลต่อค่าแรงต้านทานการตัดขาดในทั้งสองวิธีของการแช่เยือกแข็งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.23 -4.24 ดังนั้นในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจึงพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ ดังแสดงในตารางที่ 4.25 - 4.26

ตารางที่ 4.23 ค่าแรงต้านทานการตัดขาดของกึ่งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบ
 ลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วที่วิธีละลายน้ำแข็งและจำนวนครั้งของการ
 แช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ

วิธีละลายน้ำแข็ง	Freeze-thaw cycles	แรงต้านทานการตัดขาด(นิวตัน)
ไมโครเวฟ	0	24.132 ± 0.006
	1	24.658 ± 0.289
	2	25.932 ± 0.516
	3	27.006 ± 2.350
	4	27.562 ± 0.135
ตู้เย็น	0	23.745 ± 0.064
	1	24.289 ± 0.011
	2	24.609 ± 0.055
	3	25.984 ± 1.859
	4	26.068 ± 1.930

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.24 ค่าแรงต้านทานการตัดขาดของกึ่งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบ
โครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วว่าวิธีละลายน้ำแข็งและจำนวนครั้งของ
การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ

วิธีละลายน้ำแข็ง	Freeze-thaw Cycles	แรงต้านทานการตัดขาด (นิวตัน)
ไม่โครเวฟ	0	23.486 ± 0.427
	1	24.132 ± 0.100
	2	24.468 ± 0.056
	3	25.436 ± 0.047
	4	25.058 ± 1.478
ตู้เย็น	0	22.471 ± 0.378
	1	23.026 ± 0.838
	2	23.718 ± 0.913
	3	24.564 ± 1.352
	4	25.153 ± 0.677

ตารางที่ 4.25 ค่าแรงต้านทานการตัดขาดของกึ่งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเมื่อพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ

Freeze – thaw cycles	แรงต้านทานการตัดขาด (นิวตัน)
0	23.939 ^b ± 0.227
1	24.473 ^b ± 0.271
2	25.271 ^{ab} ± 0.821
3	26.495 ^a ± 1.828
4	26.814 ^a ± 1.411

a, b ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันในแถวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.26 ค่าแรงต้านทานการตัดขาดของกึ่งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเมื่อพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ

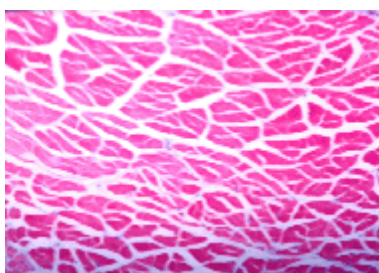
Freeze – thaw cycles	แรงต้านทานการตัดขาด (นิวตัน)
0	22.978 ^b ± 0.672
1	23.579 ^b ± 0.803
2	24.093 ^{ab} ± 0.683
3	24.500 ^a ± 0.929
4	25.106 ^a ± 0.941

a, b ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันแถวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

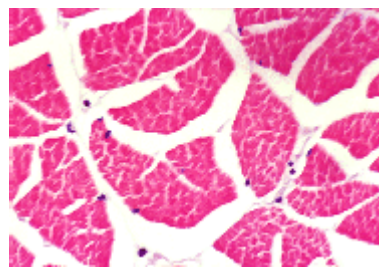
เมื่อจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำเพิ่มขึ้นพบว่าค่าแรงต้านทานการตัดขาดของกล้ามเนื้อเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำทำให้น้ำเยื่อเกิดการเสื่อมสลายทางกล น้ำเยื่อจึงไม่สามารถอุ้มน้ำไว้ได้มาก และทำให้สูญเสียน้ำออกจากเซลล์มากเมื่อนำไปละลายน้ำแข็ง (Steen and Lambelet, 1997) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่าค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อกล้ามเนื้อผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำหลายๆ ครั้ง นอกจากนี้ยังอาจเกิดการหดตัวของกล้ามเนื้อทำให้น้ำเยื่อของกล้ามเนื้อที่มีความแห้งและเหนียว เมื่อนำไปวัดลักษณะเนื้อสัมผัสในรูปของแรงต้านทานการตัดขาดจึงต้องใช้แรงในการตัดให้ตัวอย่างขาดออกจากกันมากขึ้น ความเหนียวของเนื้อที่เพิ่มขึ้นอาจมีผลมาจากการสูญเสียสภาพทางธรรมชาติของ myosin และการเกิดพันธะเชื่อมข้าม (cross-linking) ของ myosin heavy chain ทั้งในรูปของพันธะไดซัลไฟด์และไม่ใช่พันธะไดซัลไฟด์ และเกิดการจับตัว (aggregation) ของ myofibrillar proteins จึงทำให้ตัวอย่างมีความเหนียวมากขึ้น (Sikorski, 1977; Srinivasan, Xiong, Blanchard and Tidwell, 1997) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่าเมื่อกล้ามเนื้อผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำหลายๆ ครั้งจะมีปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือลดลง แสดงว่าโปรตีนในกลุ่มที่สามารถละลายในสารละลายเกลือซึ่งคือ myosin นั้นสูญเสียสภาพทางธรรมชาติไป หรืออาจเกิดจากการหดตัวของเส้นใยกล้ามเนื้อ (fiber shrinkage) และการสูญเสียน้ำที่ไหลออกมานอกเซลล์ในปริมาณมาก (Giddings and Hill, 1978; Hale and Waters, 1981)

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเนื้อเยื่อของกล้ามเนื้อดำสดเมื่อตัดลำตัวตามขวางด้วยวิธีทาง Histology แสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

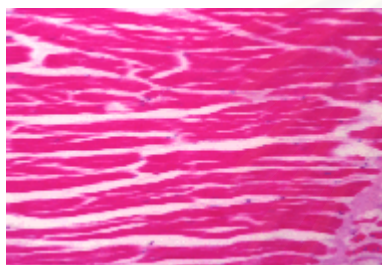


(a)

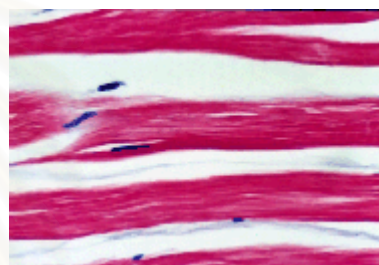


(b)

รูปที่ 4.3 ลักษณะทางเนื้อเยื่อของกึ่งกุลาดำสดเมื่อตัดลำตัวตามขวางและ focus บริเวณ inner part (a) กำลังขยาย 140 เท่า (b) กำลังขยาย 560 เท่า



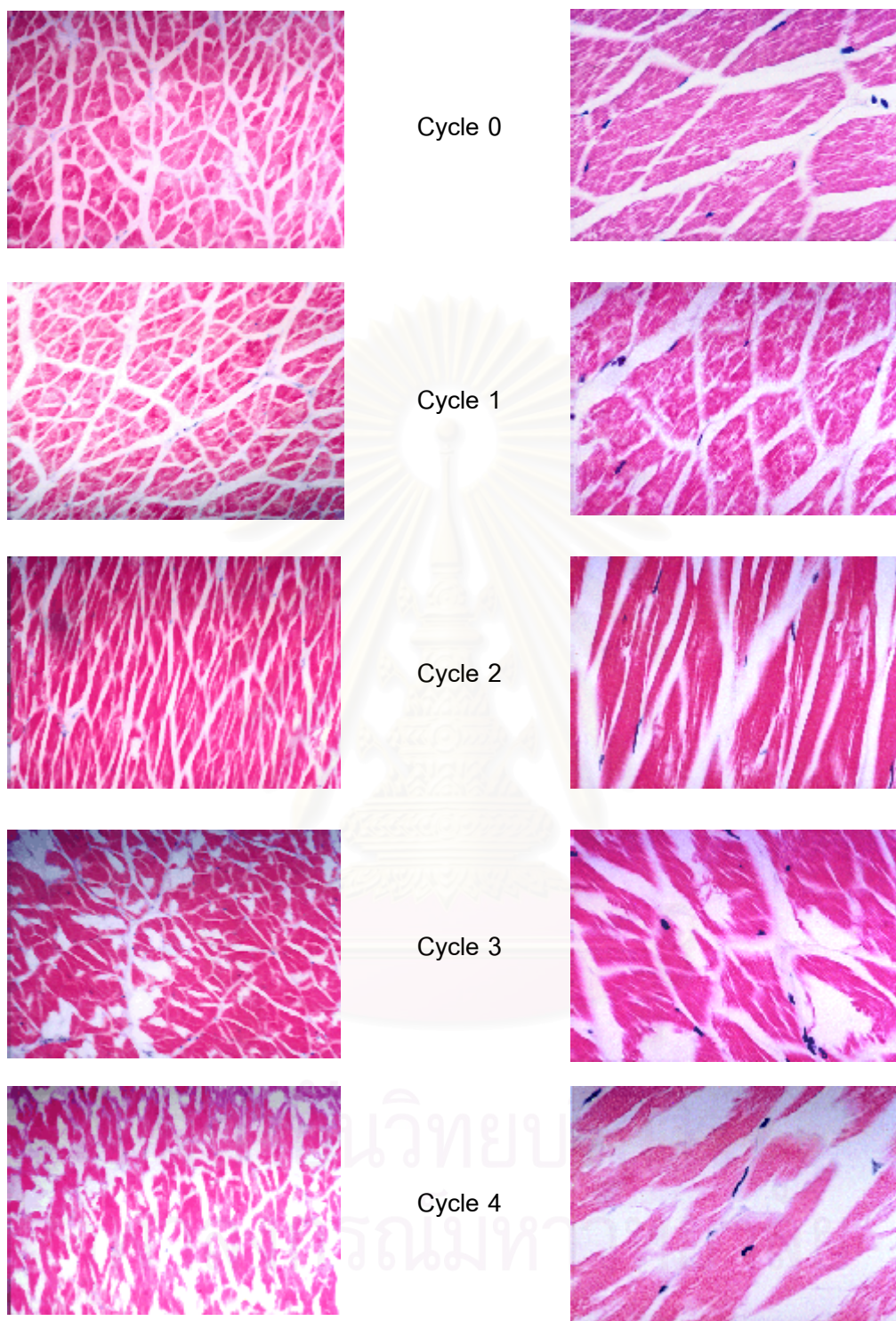
(a)



(b)

รูปที่ 4.4 ลักษณะทางเนื้อเยื่อของกึ่งกุลาดำสดเมื่อตัดลำตัวตามขวางและ focus บริเวณรอบๆ subcuticular membrane (a) กำลังขยาย 140 เท่า (b) กำลังขยาย 560 เท่า

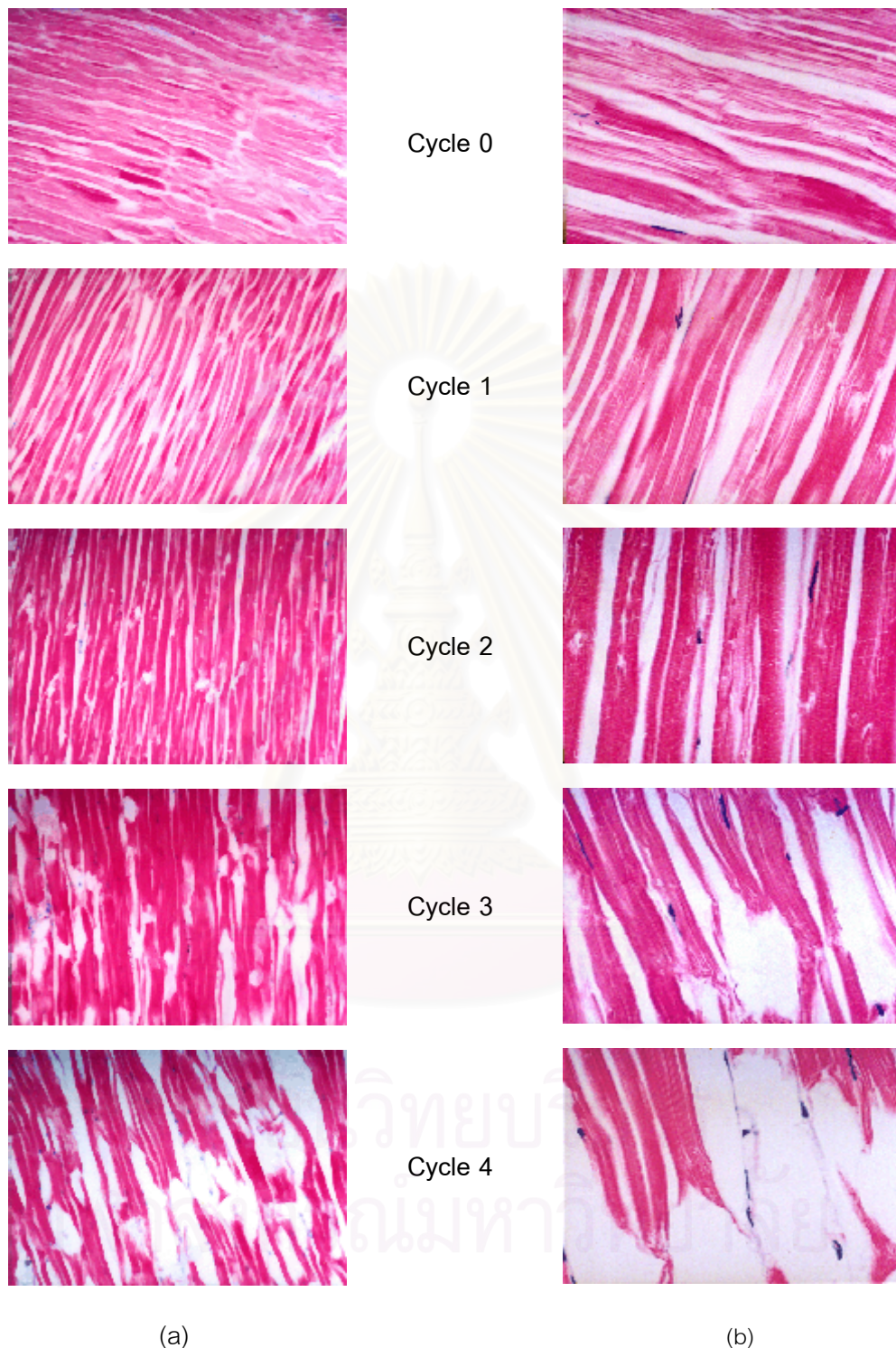
เมื่อวิเคราะห์ลักษณะทางเนื้อเยื่อของกึ่งกุลาดำที่ผ่านภาวะการแช่เยือกแข็ง-การละลาย น้ำแข็งซ้ำหลายๆ ครั้ง ซึ่งได้ทำการทดลองเฉพาะการแช่เยือกแข็งกึ่งกุลาดำด้วยวิธีแบบไครโอเจนิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วในข้อ 4.4 พบว่า มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อที่สอดคล้องไปกับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพ โดยลักษณะเนื้อเยื่อของกึ่งกุลาดำที่ผ่านการละลาย น้ำแข็งด้วยไมโครเวฟ แสดงในรูปที่ 4.5-4.6 ส่วนลักษณะเนื้อเยื่อของกึ่งกุลาดำที่ผ่านการละลาย น้ำแข็งที่อุณหภูมิตู้เย็น แสดงในรูปที่ 4.7-4.8



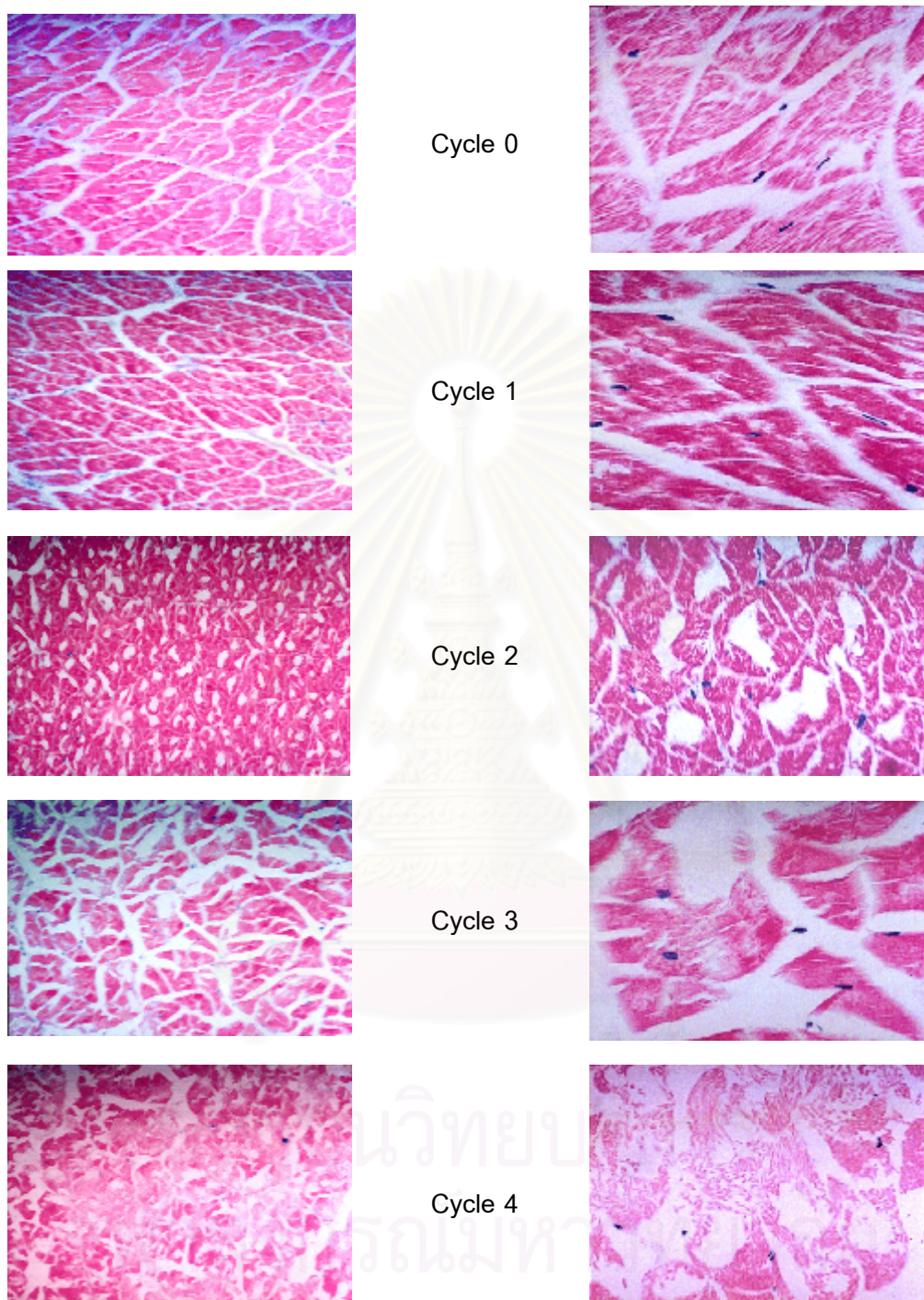
(a)

(b)

รูปที่ 4.5 ลักษณะทางเนื้อเยื่อของกึ่งกุลาดำที่ละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟและจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ เมื่อตัดลำตัวตามขวางและ focus บริเวณ inner part (a) กำลังขยาย 140 เท่า (b) กำลังขยาย 560 เท่า



รูปที่ 4.6 ลักษณะทางเนื้อเยื่อของกล้ามเนื้อดำที่ละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟและจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ เมื่อตัดลำตัวตามขวางและ focus บริเวณรอบๆ subcuticular membrane (a) กำลังขยาย 140 เท่า (b) กำลังขยาย 560 เท่า



(a)

(b)

รูปที่ 4.7 ลักษณะทางเนื้อเยื่อของกล้ามเนื้อดำที่ละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิตู้เย็นและจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ เมื่อตัดลำตัวตามขวางและ focus บริเวณ inner part (a) กำลังขยาย 140 เท่า (b) กำลังขยาย 560 เท่า

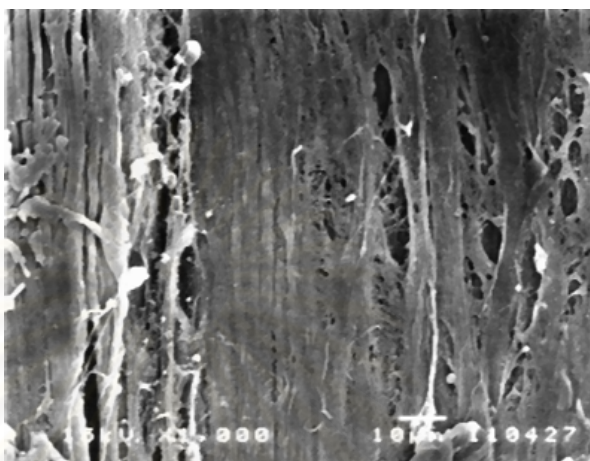


รูปที่ 4.8 ลักษณะทางเนื้อเยื่อของกึ่งกุลาดำที่ละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิตู้เย็นและจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ เมื่อตัดลำตัวตามขวางและ focus บริเวณรอบๆ subcuticular membrane (a) กำลังขยาย 140 เท่า (b) กำลังขยาย 560 เท่า

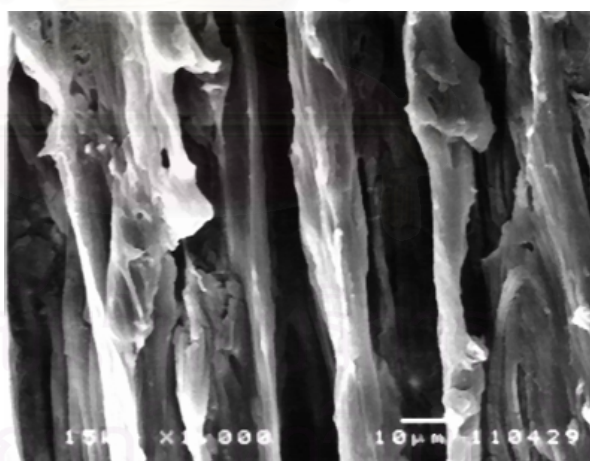
จากรูปที่ 4.5-4.6 พบว่ากึ่งกลาดำที่ผ่านการละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟและผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำหลายๆ ครั้ง จะมีลักษณะทางเนื้อเยื่อที่เปลี่ยนแปลงไป โดยระยะห่างระหว่าง muscle fiber จะมากขึ้น ในกึ่งที่ผ่าน freeze-thaw cycle ที่ 0 และ 1 จะยังคงมีลักษณะของเนื้อเยื่อที่ใกล้เคียงกับกึ่งกลาดำสด (รูปที่ 4.3-4.4) โดย muscle fiber จะเรียงตัวกันเป็นเส้นยาวที่มีความต่อเนื่อง (เมื่อ focus บริเวณรอบๆ subcuticular membrane) และมีระยะห่างของ muscle fiber ที่ใกล้เคียงกับกึ่งกลาดำสด (เมื่อ focus บริเวณ inner part) แต่หลังจากผ่าน freeze-thaw cycle ที่ 2 นั้นจะมีลักษณะของ muscle fiber ที่เริ่มเปลี่ยนแปลงไป และเมื่อผ่าน freeze-thaw cycle ในครั้งที่ 3 และ 4 พบว่า muscle fiber จะไม่เรียงตัวกันเป็นเส้นเดียว แต่จะขาดออกจากกันและเรียงตัวกันไม่ต่อเนื่อง และระยะห่างของ muscle fiber ก็จะมีมากขึ้นด้วย นอกจากนี้จะเห็นว่าขอบเขตของ muscle fiber จะไม่ชัดเจน ซึ่งอาจจะมีผลมาจากการเสื่อมสลายทางกลของเนื้อเยื่อ ลักษณะที่พบนี้สอดคล้องกับผลการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพ โดยจะเห็นได้ชัดในค่า TBA และ ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็งที่พบว่ากึ่งที่ผ่านการละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟจะมีค่า TBA เพิ่มขึ้นจาก freeze-thaw cycle ที่ 0 ไปเป็น freeze-thaw cycle ที่ 1 เท่ากับ 4.71 % เพิ่มขึ้นจาก freeze-thaw cycle ที่ 1 ไปเป็น freeze-thaw cycle ที่ 2 เท่ากับ 30.34 % จากนั้นจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 0.86 % หลังจากผ่าน freeze-thaw cycle ครั้งที่ 3 แต่เมื่อผ่าน freeze-thaw cycle ครั้งที่ 4 จะมีค่า TBA เพิ่มขึ้นอย่างมากโดยเพิ่มขึ้นถึง 44.02 % (ตารางที่ 4.10) ผลค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็ง พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นจาก freeze-thaw cycle ที่ 1 ไปเป็น freeze-thaw cycle ที่ 2 เท่ากับ 40.48 % จากนั้นจะเพิ่มขึ้นเป็น 49.72 และ 82.64 % ตามลำดับ (ตารางที่ 4.22)

จากรูปที่ 4.7-4.8 พบว่ากึ่งกลูตาต้าที่ผ่านการละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิตู้เย็นและผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำหลายๆ ครั้ง จะมีลักษณะทางเนื้อเยื่อที่เปลี่ยนแปลงไปในลักษณะเช่นเดียวกับการละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟ โดยระยะห่างระหว่าง muscle fiber จะมากขึ้น ในกึ่งที่ผ่าน freeze-thaw cycle ที่ 0 และ 1 จะยังคงมีลักษณะของเนื้อเยื่อที่ใกล้เคียงกับกึ่งกลูตาต้าสด (รูปที่ 4.3-4.4) โดย muscle fiber จะเรียงตัวกันเป็นเส้นยาวที่มีความต่อเนื่อง (เมื่อ focus บริเวณรอบๆ subcuticular membrane) และมีระยะห่างของ muscle fiber ที่ใกล้เคียงกับกึ่งกลูตาต้าสด (เมื่อ focus บริเวณ inner part) แต่หลังจากผ่าน freeze-thaw cycle ที่ 2 นั้นพบว่าจะมีลักษณะของ muscle fiber ที่เริ่มเปลี่ยนแปลงไปโดยจะเห็นได้ชัดว่ามีช่องว่างที่เกิดขึ้นขนาดใหญ่ (รูปที่ 4.7) ซึ่งน่าจะเป็นช่องว่างของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้น เนื่องจากการที่กึ่งกลูตาต้าผ่านภาวะการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำนั้นจะเกิดผลึกน้ำแข็งขึ้นเมื่อนำกึ่งไปเก็บที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส และในช่วงที่เกิดผลึกน้ำแข็งนี้จะมีลักษณะการเกิดของผลึกน้ำแข็งคล้ายๆ กับการแช่เยือกแข็งที่มีอัตราเร็วแบบช้า ซึ่งจะทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่และเกิดบริเวณภายนอกเซลล์ น้ำที่อยู่ภายในเซลล์จะถูกดึงมาช่วยเพิ่มขนาดของผลึกที่ภายนอกเซลล์โดยผ่านกระบวนการ osmosis เป็นผลให้เซลล์หดตัวลดขนาดลง ผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นนี้จะมีผลต่อตัวอย่างโดยเมื่อนำตัวอย่างไปละลายน้ำแข็งจะเกิดช่องว่างขนาดใหญ่ทำให้ไม่สามารถจะดูดซับน้ำกลับในระหว่างการละลายน้ำแข็งได้ จึงเป็นผลให้ drip loss สูงขึ้น (Boegh-Soerensen and Jul, 1985) และเมื่อผ่าน freeze-thaw cycle ในครั้งที่ 3 และ 4 พบว่า muscle fiber จะไม่เรียงตัวกันเป็นเส้นเดียว แต่จะขาดออกจากกันและเรียงตัวกันไม่ต่อเนื่อง และระยะห่างของ muscle fiber ก็จะมีมากขึ้นด้วย นอกจากนี้จะเห็นว่าขอบเขตของ muscle fiber จะไม่ชัดเจน ซึ่งอาจจะมีผลมาจากการเสื่อมสลายทางกลของเนื้อเยื่อ ลักษณะที่พบนี้สอดคล้องกับผลการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพ โดยจะเห็นได้ชัดในค่า TBA และ ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการละลายน้ำแข็งที่พบว่ากึ่งที่ผ่านการละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟจะมีค่า TBA เพิ่มขึ้นจาก freeze-thaw cycle ที่ 0 ไปเป็น freeze-thaw cycle ที่ 1 เท่ากับ 10.34 % เพิ่มขึ้นจาก freeze-thaw cycle ที่ 1 ไปเป็น freeze-thaw cycle ที่ 2 เท่ากับ 35.16 % จากนั้นจะเพิ่มขึ้นเป็น 23.70 % หลังจากผ่าน freeze-thaw cycle ครั้งที่ 3 แต่เมื่อผ่าน freeze-thaw cycle ครั้งที่ 4 จะมีค่า TBA เพิ่มขึ้นอย่างมากโดยเพิ่มขึ้นถึง 56.08 % (ตารางที่ 4.10) ผลค่าร้อยละการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็ง พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นจาก freeze-thaw cycle ที่ 1 ไปเป็น freeze-thaw cycle ที่ 2 เท่ากับ 158.33 % จากนั้นจะเพิ่มขึ้นเป็น 38.71 และ 54.26 % ตามลำดับ (ตารางที่ 4.22)

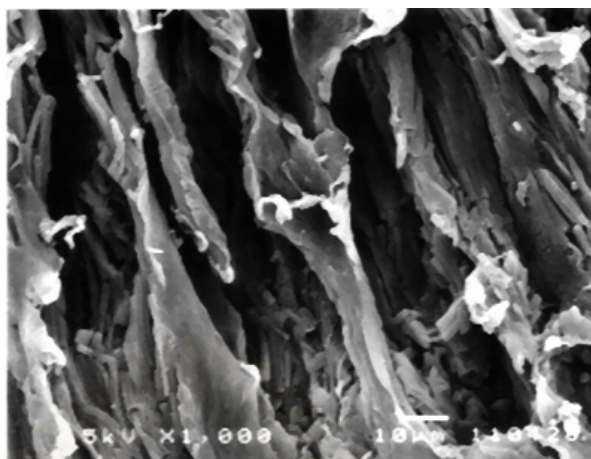
นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์ลักษณะทางเนื้อเยื่อโดยการใช้อัลตร้าสตรัคเจอร์สแกนนิ่งอิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยศึกษาลักษณะเนื้อเยื่อของกึ่งกลาดำสด กึ่งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบไครโอจินิกตามภาวะที่คัดเลือกแล้วและผ่านการละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟตลอดจนผ่านการละลายน้ำแข็ง-การแช่เยือกแข็งซ้ำในครั้งที่ 2 และ 4 ดังแสดงในรูปที่ 4.9-4.11



รูปที่ 4.9 ลักษณะทางเนื้อเยื่อของกึ่งกลาดำสดโดยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเมื่อตัดลำตัวตามขวาง (กำลังขยาย 1,000 เท่า)



รูปที่ 4.10 ลักษณะทางเนื้อเยื่อของกึ่งกลาดำที่ผ่านการละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟและผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ 2 ครั้ง (freeze-thaw cycle ที่ 2) โดยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเมื่อตัดลำตัวตามขวาง (กำลังขยาย 1,000 เท่า)



รูปที่ 4.11 ลักษณะทางเนื้อเยื่อของกึ่งกูดำที่ผ่านการละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟและผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ 4 ครั้ง (freeze-thaw cycle ที่ 4) โดยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเมื่อตัดลำตัวตามขวาง (กำลังขยาย 1,000 เท่า)

จากรูปที่ 4.9-4.11 จะเห็นว่ากึ่งกูดำที่ผ่านการละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟและผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำในครั้งที่ 2 และ 4 จะมีลักษณะทางเนื้อเยื่อที่เปลี่ยนแปลงไป โดยระยะห่างระหว่าง muscle fiber จะมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกึ่งกูดำสด ซึ่งสาเหตุที่มีการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้สามารถอธิบายได้ว่าเกิดจากการเสื่อมสลายทางกลของเนื้อเยื่ออันเป็นผลมาจากการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำหลายๆ ครั้ง และเป็นการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายๆ กับการเปลี่ยนแปลงในตัวอย่างที่มีการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งแบบช้า

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

1. ภาวะที่เหมาะสมในการแช่เยือกแข็งกึ่งกุลาดำด้วยวิธีแบบลมพ่นคือ การใช้ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที เนื่องจากมีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งน้อยที่สุด และทำให้กึ่งกุลาดำที่ผ่านการละลายน้ำแข็งแล้วมีค่าแรงต้านทานการตัดขาดไม่แตกต่างกับกึ่งกุลาดำสดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

2. ภาวะที่เหมาะสมในการแช่เยือกแข็งกึ่งกุลาดำด้วยวิธีแบบโครโอจินิกคือ อุณหภูมิ -70 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งไม่แตกต่างจากระดับอุณหภูมิอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และทำให้กึ่งกุลาดำที่ผ่านการละลายน้ำแข็งแล้วมีค่าแรงต้านทานการตัดขาดไม่แตกต่างกับกึ่งกุลาดำสดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

3. วิธีการละลายน้ำแข็ง และการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำมีผลต่อค่า TBA ในทั้งสองวิธีของการแช่เยือกแข็ง โดยการละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟจะทำให้กึ่งกุลาดำมีค่า TBA สูงกว่าการละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิตู้เย็นในหลายๆ ครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ และเมื่อเพิ่มจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ พบว่าค่า TBA จะเพิ่มขึ้นในทั้งสองวิธีของการละลายน้ำแข็ง

4. วิธีการละลายน้ำแข็ง และการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำมีผลร่วมต่อค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็ง และปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้ในทั้งสองวิธีของการแช่เยือกแข็ง โดยทั้งค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็งและปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้จะมีค่าสูงที่สุดในการทดลองเมื่อกึ่งกุลาดำผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำในครั้งที่ 4 และเมื่อเพิ่มจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ พบว่าค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็ง และปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้จะเพิ่มขึ้นในทั้งสองวิธีของการละลายน้ำแข็ง

5. วิธีการละลายน้ำแข็งไม่มีผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือ และ ค่าแรงต้านทานการตัดขาด แต่การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำมีผลต่อค่าต่างๆ ดังกล่าวในทั้งสองวิธีของการแช่เยือกแข็ง โดยเมื่อเพิ่มจำนวนครั้งของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าแรงต้านทานการตัดขาดจะเพิ่มขึ้น ส่วน ปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือจะลดลง

6. การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมีและกายภาพในด้านต่างๆ นั้นสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเนื้อเยื่อของกึ่งกล้ามเนื้อโดยระยะห่างระหว่าง muscle fiber จะเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำหลายๆ ครั้ง และการเปลี่ยนแปลงจะชัดเจนหลังจากผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำในครั้งที่ 2 โดยเนื้อเยื่อเกิดการเสื่อมสลายทางกลซึ่งเป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพต่างๆ

ข้อเสนอแนะ

1. กึ่งกล้ามเนื้อเป็นสินค้าทางการเกษตรที่มีความแตกต่างตามฤดูกาล ดังนั้นจึงควรควบคุมคุณภาพให้สม่ำเสมอก่อนที่จะนำมาศึกษาในงานวิจัยหรือก่อนที่จะนำมาแปรรูปในระดับอุตสาหกรรม โดยการควบคุมคุณภาพอาจใช้หลักเกณฑ์ต่างๆ เช่น การควบคุมคุณภาพความสดซึ่งอาจตรวจสอบได้จากลักษณะปรากฏ การทดสอบทางประสาทสัมผัส หรือวัดค่าความสดในรูปของปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้
2. การแช่เยือกแข็ง และการละลายน้ำแข็งสามารถทำได้หลายวิธี สามารถเลือกให้เหมาะสมกับความต้องการหรือตามอุปกรณ์ที่มีอยู่แล้ว อาจเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่ซึ่งสามารถปรับสภาวะต่างๆ เพื่อให้มีอัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งหรือการละลายน้ำแข็งที่ต่างกันก็ได้
3. วิธีการละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟตามภาวะที่ใช้ในการทดลองนั้น อาจไม่เหมาะสมกับตัวอย่างที่มีรูปร่างที่ไม่สมมาตร ดังนั้นจึงอาจใช้วิธีการละลายน้ำแข็งแบบผสมโดยใช้วิธีการละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟร่วมกับการละลายน้ำแข็งในน้ำที่มีการหมุนวน
4. การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพที่วิเคราะห์ได้นั้นเป็นการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือ ซึ่งถ้าหากมีการวิเคราะห์ทางประสาทสัมผัสร่วมด้วย อาจทำให้ทราบว่าการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพต่างๆ นั้นอยู่ในเกณฑ์ที่ผู้ทดสอบทางประสาทสัมผัสยอมรับได้หรือไม่

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

เกษตรและสหกรณ์, กระทรวง. 2542. ข้อมูลด้านการผลิตและการตลาดสินค้าเกษตรที่สำคัญ.

กรุงเทพมหานคร: สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร.

ทวี จินตธรรม. 2538. รายงานผลการวิจัยเรื่อง ระบบการตลาดกึ่งกลาดำของประเทศไทย.

กรุงเทพมหานคร: กองวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร.

ธนกร โจจนกร. 2538. เอกสารประกอบการสอน เรื่อง การถนอมอาหารโดยวิธีแช่เยือกแข็ง.

ขอนแก่น: ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

นงลักษณ์ สุทธิวิช. 2531. คุณภาพสัตว์น้ำ. สงขลา: ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร

คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ปรียา วิบูลย์เศรษฐ์. 2538. เอกสารประกอบการสอน เรื่อง จุลชีววิทยาของผลิตภัณฑ์อาหาร.

กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร

คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พรรณิภา หาญวิวัฒน์กิจ. 2531. การวิเคราะห์เศรษฐกิจการผลิตกึ่งกลาดำในประเทศไทย.

กรุงเทพมหานคร: ฝ่ายวิจัยเศรษฐกิจการประมง กองนโยบายและแผนงานประมง

กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

พันธิพา จันทวัฒน์ และคณะ. 2528. รายงานผลการวิจัยเงินทุนอุดหนุนเพื่อเพิ่มพูนและพัฒนา

ประสิทธิภาพทางวิชาการคณะกรรมการปฏิบัติการกิจการวิจัยอาหาร เรื่อง การศึกษา

คุณภาพที่เกี่ยวกับการบรรจุ การเก็บ และกรรมวิธีแปรรูปปลาหมึกกระดอง.

กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ไพบุลย์ ธรรมรัตน์วาศิก. 2532. กรรมวิธีการแปรรูปอาหาร. สงขลา: ภาควิชาอุตสาหกรรม

เกษตร คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

โภชนาการ, กอง. 2530. ตารางแสดงคุณค่าอาหารไทยในส่วนของกินได้ 100 กรัม.

พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: กองโภชนาการ กรมอนามัย.

มยุรี จัยวัฒน์. 2527. การให้ความเย็นผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำ. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชา

ผลิตภัณฑ์ประมง คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. 2535. วิศวกรรมแปรรูปอาหาร : การถนอมอาหาร.

กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเทคโนโลยีการเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- วัลลภ คงเพิ่มพูน. 2532. กุ้งกุลาดำ. กรุงเทพมหานคร: โครงการหนังสือเกษตรชุมชนมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วรรณวิบูลย์ กาญจนกฤษช. 2539. สัตว์น้ำและผลิตภัณฑ์. ใน วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, หน้า 282-294. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เศรษฐกิจการพาณิชย์, กรม. 2542. สถานการณ์ส่งออกผลิตภัณฑ์กุ้งสดแช่เย็นแช่แข็งของไทย (อินเตอร์เน็ต). กรุงเทพมหานคร: กองวิจัยสินค้า กระทรวงพาณิชย์.
- เศรษฐกิจการพาณิชย์, กรม. 2545. สถานการณ์ส่งออกผลิตภัณฑ์กุ้งสดแช่เย็นแช่แข็งของไทย (อินเตอร์เน็ต). กรุงเทพมหานคร: กองวิจัยสินค้า กระทรวงพาณิชย์.
- สายสนม ประดิษฐ์ดวง. 2539. กระบวนการแช่เยือกแข็งอาหาร. ใน วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, หน้า 131-163. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สำนักงานเลขาธิการวุฒิสภา. 2541. แนวทางการพัฒนาการผลิตและส่งออกสินค้าเกษตร กรณีศึกษาเรื่อง กุ้งกุลาดำ. ร่างรายงานของคณะกรรมการการเกษตรและสหกรณ์ วันที่ 20 เมษายน 2541.
- สำนักบริหารธนาคารกสิกรไทย, ส่วนวิชาการ. 2521. กุ้ง. กรุงเทพมหานคร: ปีที่ 1 ฉบับที่ 4.
- อนุตรา อัครจามร. 2534. การศึกษาทางเนื้อเยื่อของกุ้งกุลาดำ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์การประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2529. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกุ้งเยือกแข็ง มอก. 115-2529. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.

ภาษาอังกฤษ

- Anzaldua-Morales, A., Brusewitz, G. H., and Anderson, J. A. 1999. Pecan texture as affected by freezing rates, storage temperature and thawing rates. *Journal of Food Science*. 64: 332-335.
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). 1995. Official Methods of Analysis of AOAC International. 16th ed. Washington, D.C.: AOAC International.
- Aurell, T., Dagbjartsson, B., and Salomonsdottir, E. 1976. A comparative study of freezing qualities of seafoods obtained by using different freezing methods. *Journal of Food Science*. 41: 1165-1167.

- Bhobe, A. M. and Pai, J. S. 1986. Study of the properties of frozen shrimps. *Journal of Food Science and Technology*. 23: 143-147.
- Boast, M.F.G. 1985. The Technology of Freezing. In R.K. Robinson (ed.), Microbiology of Frozen Foods, pp. 6-7. New York: Elsevier Applied Science Publishers.
- Boegh-Soerensen, L. and Jul, M. 1985. Effects of Freezing/Thawing on Foods. In R. K. Robinson (ed.), Microbiology of Frozen Foods, pp. 48-50. New York: Elsevier Applied Science Publishers.
- Botta, J. R. 1994. Freshness Quality of Seafoods: A Review. In F. shahidi and J. R. Botta (eds.), Seafoods: Chemistry, Processing Technology and Quality, pp.140-167. New York: Blackie Academic & Professional.
- Chandrasekaran, M. 1994. Methods for preprocessing and freezing of shrimps: A critical evaluation. *Journal of Food Science and Technology*. 31(6): 441-452.
- Fellows, P. J. 1990. Food Processing Technology: Principle and Practice. England: Ellis Horwood.
- Fennema, O. R., Powrie, W. D., and Marth, E. H. 1973. Low-Temperature Preservation of Foods and Living Matter. New York: Marcel Dekker, INC.
- Giddings, G.G. and Hill, L.H. 1978. Relationship of freezing preservation parameters to texture-related structural damage to thermally processed crustacean muscle. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2: 249-264.
- Hale, M. B. and Waters, M. E. 1981. Frozen storage stability of whole and headless freshwater prawns (*Macrobrachium rosenbergii*). *Marine Fisheries Review*. 42: 18-21.
- Hurling, R. and McArthur, H. 1996. Thawing, refreezing and frozen storage effects on muscle functionality and sensory attributes of frozen cod (*Gadus morhua*). *Journal of Food Science*. 61(6): 1289-1296.
- I. I. R.(International Institute of Refrigeration).1972. Recommendations for the Processing and Handling of Frozen Foods. Paris: International Institute of Refrigeration.

- Jiang, S. T., Hwang, B. S., Moody, M. W., and Chen, H. C. 1991. Thermostability and freeze denaturation of grass prawn (*Penaeus monodon*) muscle proteins. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*. 39: 1998-2001.
- Jul, M. 1984. The Quality of Frozen Foods. New York: Academic Press.
- Karel, M., Fennema, O. R., and Lund, D. B. 1975. Principles of Food Science Part II Physical Principles of Food Preservation. New York: Marcel Dekker, INC.
- Mallett, C.P. 1993. Frozen Food Technology. New York: Blackie Academic & Professional.
- MFRD (Marine Fisheries Research Development). 1987. Laboratory Manual on Analytical Methods and Procedures for Fish and Fish Products. Singapore: Southeast Asian Fisheries Development Center.
- Pan, B. S. and Yeh, W. T. 1993. Biochemical and morphological changes in grass shrimp (*Penaeus monodon*) muscle following freezing by air blast and liquid nitrogen methods. *Journal of Food Biochemistry*. 17: 147-160.
- Pearson, D. 1976. The Chemical Analysis of Foods. 7th ed. London: Churchill Livingstone Publishing.
- Pedraja, R.R. 1970. Change of composition of shrimp and other marine animals during processing. *Food Technology*. 24(12): 37-42.
- Rossell, J. B. 1983. Measurement of Rancidity. In J. C. Allen and R. J. Hamilton (eds.), Rancidity in Foods, pp. 29-30. New York: Applied Science Publishers.
- Sebranek, J. G. 1982. Use of cryogenic for muscle foods. *Food Technology*. 36(4): 120-127.
- Shamasunder, B. A. and Prakash, V. 1994. Properties of the proteins from drip of frozen prawn (*Metapenaeus dobsoni*). *Journal of Food Science and Technology*. 31(6): 459-462.
- Sikorski, Z. E. 1977. Protein Changes in Muscle Foods Due To Freezing and Frozen Storage. I.I.R. Commissions C1 and C2: Ettlingen, Germany.
- Siu, G. M. and Draper, H. H. 1978. A survey of the malonaldehyde content of retail meats and fish. *Journal of Food Science*. 43: 1147-1149.

- Srinivasan, S., Xiong, Y. L., and Blanchard, S. P. 1997. Effects of freezing and thawing methods and storage time on thermal properties of freshwater prawns (*Macrobrachium rosenbergii*) . *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 75: 37-44.
- Srinivasan, S., Xiong, Y. L., Blanchard, S. P., and Tidwell, J. H. 1997. Physicochemical changes in prawns (*Macrobrachium rosenbergii*) subjected to multiple freeze-thaw cycles. *Journal of Food Science*. 62(1): 123-127.
- Srinivasan, S., Xiong, Y. L., Blanchard, S. P., and Tidwell, J. H. 1998. Effects of freezing and thawing methods and storage time on physicochemical properties of freshwater prawns (*Macrobrachium rosenbergii*) . *Journal of Aquatic Food Product Technology* . 7(2): 47-68.
- Steen, C. and Lambelet, P. 1997. Texture changes in frozen cod mince measured by low-field nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 75: 268-272.
- van den Berg, L. 1961. Changes in pH of some frozen foods during storage. *Food Technology*. 15: 434-437.
- Verma, J.K. and Srikar, L.N. 1994. Protein and lipid changes in pink perch (*Nemipterus japonicus*) mince during frozen storage. *Journal of Food Science and Technology*. 31(3): 238-240.
- Wagner, J. R. and Anon, M. C. 1985. Effect of freezing rate on the denaturation of myofibrillar proteins. *Journal of Food Technology*. 20: 735-744



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์ทางเคมีและกายภาพ

ก.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (ดัดแปลงจาก AOAC(1995) section 39.1.02 B)

อุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Sartorius, A200S)
2. ตู้อบลมร้อน (Binder, ED)
3. โถดูดความชื้น

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 5 กรัม
2. นำตัวอย่างไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100-105 องศาเซลเซียส นานประมาณ 6 ชั่วโมง
3. นำออกจากตู้อบและทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนัก
4. นำไปอบต่ออีกประมาณ 1 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่
5. คำนวณปริมาณความชื้นหรือน้ำที่หายไป

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{[\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (กรัม)}] \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)}}$$

ก.2 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน (ดัดแปลงจาก AOAC(1995) section 39.1.15)

อุปกรณ์

1. ชุดวิเคราะห์โปรตีน (Kjeldatherm and Vapodest I, Gerhardt, KT 85)

สารเคมี

1. Sodium hydroxide (Commercial grade) เตรียมให้มีความเข้มข้นร้อยละ 50
2. Boric acid (A.R. grade) เตรียมให้มีความเข้มข้นร้อยละ 4
3. Hydrochloric acid 37 % (A.R. grade) เตรียมให้มีความเข้มข้น 0.1 N
4. Selenium reagent mixture (A.R. grade)
5. Sulfuric acid (A.R. grade)
6. อินดิเคเตอร์ (สารละลายเมทิลเรด และสารละลายโบรโมครีซอลกรีน ในสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ในอัตราส่วน 1 ต่อ 5)

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 2 กรัม ใส่ลงในหลอดย่อย
2. เติม Selenium reagent mixture ซึ่งเป็นคะตะลิสต์ (catalyst) ประมาณ 5 กรัม และกรดซัลฟิวริกเข้มข้นปริมาตร 30 มิลลิลิตร นำไปย่อยบนเตาย่อย โดยค่อยๆ เพิ่มความร้อนในการย่อย ย่อยตัวอย่างจนส่วนผสมในหลอดย่อยกลายเป็นสีเขียว จากนั้นปิดเตาย่อย และทิ้งไว้ให้เย็นเป็นเวลานานประมาณ 30 นาที
3. เติมน้ำกลั่นลงไปในหลอดย่อยหลอดละ 30 มิลลิลิตร เพื่อละลายตะกอนที่เกิดขึ้น
4. เตรียมฟลาสก์ที่มีสารละลายกรดบอริกความเข้มข้นร้อยละ 4 ปริมาตร 50 มิลลิลิตรที่ผสมอินดิเคเตอร์แล้ว 2-3 หยด สำหรับรับสารที่กลั่นได้ที่ปลาย condenser ของเครื่องกลั่น
5. นำหลอดตัวอย่างที่ผ่านการย่อยต่อเข้ากับเครื่องกลั่น จากนั้นค่อยๆ เติมสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 50 หยดการเติมเมื่อสารละลายในหลอดย่อยเปลี่ยนเป็นสีเทาดำ
6. ในระหว่างการกลั่นจะเกิดแอมโมเนียขึ้น แอมโมเนียที่เกิดขึ้นนี้จะถูกจับไว้ด้วยสารละลายกรดบอริกที่เตรียมจากข้อ 4. รองรับสิ่งที่กลั่นได้ซึ่งเป็นสารละลายสีเขียวจนได้ปริมาตร 200 มิลลิลิตร
7. ล้างส่วนปลายของ condenser ด้วยน้ำกลั่นใส่ลงในฟลาสก์ที่รองรับสิ่งที่กลั่นได้
8. นำสารละลายในฟลาสก์ทั้งหมดมาไทเทรตกับกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.1 N และมีการหาความเข้มข้นที่แน่นอนไว้แล้ว จนได้จุดยุติ (end point) เป็นสีชมพู
9. ทำตัวเทียบ (blank) โดยใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่าง และวิเคราะห์เช่นเดียวกัน
10. คำนวณหาปริมาณโปรตีน

$$\text{ปริมาณโปรตีนทั้งหมด (\%)} = \frac{(V_a - V_b) \times N \times 1.4 \times CF}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)}}$$

เมื่อกำหนดให้

V_a = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริก ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง

V_b = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริก ที่ใช้ไทเทรต blank

N = ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรต หน่วยเป็น Normal

CF = conversion factor สำหรับเปลี่ยนไนโตรเจนให้เป็นโปรตีน (ในการทดลองใช้ค่าเป็น 6.25)

ก.3 การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (ดัดแปลงจาก AOAC (1995) section 39.1.05)

อุปกรณ์

1. ตู้อบลมร้อน (Binder, ED)
2. Soxhlet apparatus (Gerhardt)
3. โถดูดความชื้น

สารเคมี

1. Petroleum ether (A.R. grade)

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างแล้วนำไปอบแห้งให้ได้น้ำหนักประมาณ 5 กรัม ห่อด้วยกระดาษกรอง Whatman No. 1
2. ใส่ตัวอย่างในทิมเบิล (thimble) ซึ่งบรรจุในขวดสกัดที่แห้งสนิทและทราบน้ำหนักที่แน่นอน
3. เติมน้ำมันปิโตรเลียมอีเทอร์ ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ลงในขวดสกัด แล้วต่อเข้ากับชุดสกัด ใช้เวลาในการสกัดไขมันนาน 6-8 ชั่วโมง
4. ระเหยเอาปิโตรเลียมอีเทอร์ออกจากไขมันที่สกัดได้
5. นำไขมันที่ได้หรือน้ำมันที่ได้ในขวดสกัดไปอบที่อุณหภูมิ 100 ± 2 องศาเซลเซียส นานประมาณ 2 ชั่วโมง หรือจนได้น้ำหนักคงที่ แล้วทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น
6. ชั่งน้ำหนักของน้ำมันที่ได้จากการสกัด คำนวณหาปริมาณไขมัน

$$\text{ปริมาณไขมัน (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของน้ำมันที่สกัดได้ (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)}}$$

ก. 4 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (ดัดแปลงจาก AOAC (1995) section 35.1.14)

อุปกรณ์

1. เตาเผาเถ้า (Fisher Scientific, Isotemp)
2. กรูซีเบิล (crucible)
3. hot plate

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักแน่นอนจำนวน 2 กรัม ใส่ในกรูซีเบิลที่ผ่านการเผาและทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้ว
2. นำตัวอย่างไปเผาโดยใช้ hot plate ในตู้ดูดควัน จนกระทั่งตัวอย่างไม่มีควัน

3. นำตัวอย่างไปเผาต่อในเตาเผาแก้ว ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมงหรือจนกระทั่งได้แก้วสีขาว
4. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น
5. ชั่งน้ำหนักแก้วที่ได้ คำนวณหาปริมาณแก้ว

$$\text{ปริมาณแก้ว (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักแก้วหลังเผา (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)}}$$

ก. 5 การวิเคราะห์ค่า TBA (Pearson, 1976)

อุปกรณ์

1. ชุคกลั่น
2. ฟลาสก์ก้นกลมคดยาว (digestion flask)
3. Spectrophotometer (Milton Roy, Spectronic 601)
4. hot plate

สารเคมี

1. สารละลายกรดไธโอบาร์บิทูริก (กรด thiobarbituric 0.2883 กรัม ใน glacial acetic acid 90 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร)
2. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก เตรียมให้มีความเข้มข้น 4 M
3. สารกันฟอง (Silicone antifoam)

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างน้ำหนัก 10 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 97.5 มิลลิลิตร ใส่ในฟลาสก์ก้นกลม
2. เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 4 M ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร และสารกันฟองลงไปเล็กน้อย เขย่าให้เข้ากัน
3. ต่อเข้ากับชุคกลั่น กลั่นจนได้ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เขย่าสิ่งที่กลั่นได้ให้ผสมกันทั่ว
4. ปิเปตสิ่งที่กลั่นได้มา 5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดแก้วที่มีฝาปิด
5. เติมสารละลายกรด thiobarbituric ที่เตรียมไว้ 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นคลายฝาออก
6. นำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 35 นาที จากนั้นทำให้เย็นโดยแช่ในน้ำเป็นเวลา 10 นาที
7. นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง (OD) โดยใช้เครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 538 นาโนเมตร โดยใช้น้ำรวมกับสารละลายกรด thiobarbituric อย่างละ 5 มิลลิลิตร เป็นตัวเทียบ (blank)

6. ใส่สารละลายอิมิตัว potassium carbonate ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ภายใน Outer ring ของจาน Conway โดยใส่คนละด้านกับสารละลายตัวอย่าง
7. รีบปิดฝาจาน Conway ทันที หนีบด้วยคลิป แล้วผสมสารละลายที่อยู่ใน Outer ring ของจาน Conway โดยหมุนเบาๆ
8. เก็บที่ 37 °C นาน 2 ชั่วโมง
9. ไตเตรทสารละลาย Inner ring ด้วย 0.02 N HCl ที่เทียบมาตรฐานจนทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว จนสีเขียวเปลี่ยนเป็นสีชมพู
10. คำนวณปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้ (TVB)

$$\text{ค่า TVB (mg N/100 g sample)} = \frac{(V_S - V_B) \times N_{\text{HCl}} \times 14 \times [(W_S \times M/100) + V_{\text{TCA}}] \times 100}{W_S}$$

เมื่อ V_S คือ ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ไตเตรทกับสารละลายตัวอย่าง

V_B คือ ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ไตเตรทกับ Blank

N_{HCl} คือ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ไตเตรท (หน่วยเป็น Normal)

W_S คือ น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

M คือ ร้อยละความชื้นของตัวอย่าง

V_{TCA} คือ ปริมาตรของ TCA ที่ใช้ในการสกัด

ก.7 การวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) (Bhobe and Pai, 1986)

อุปกรณ์

1. เครื่องปั่น
2. pH meter (Schott, CG 840)

วิธีการ

1. ชั่งเนื้อกุ้ง 25 กรัม ผสมในน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปั่นในเครื่องปั่น
2. วัดค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยเครื่อง pH meter

ก. 8 การวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือ (MFRD, 1987)

อุปกรณ์

1. เครื่องปั่น (blender)
2. เครื่องเหวี่ยงแยกที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ (Refrigerated centrifuge)
(Heraeus Christ, Varifuge K)

สารเคมี

1. Disodium hydrogenphosphate (A.R. grade) เตรียมให้มีความเข้มข้น 0.3 M
2. Potassium dihydrogenphosphate (A.R. grade) เตรียมให้มีความเข้มข้น 0.3 M
3. Potassium chloride (A.R. grade)
4. สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (phosphate buffer solution) เตรียมโดยนำสารในข้อ 1. และ 2. มาผสมกันและปรับให้มีค่า pH เป็น 6.85 โดยใช้สารในข้อ 1. และ 2. เป็นตัวปรับ pH
5. สารละลายโปแตสเซียมคลอไรด์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.6 M (0.6 M potassium chloride phosphate buffered solution) โดยชั่งโปแตสเซียมคลอไรด์ (สารในข้อ 3.) มา 44.73 กรัม ละลายในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (สารละลายในข้อ 4.) ปริมาตร 1 ลิตร
6. สารเคมีอื่นๆ เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างน้ำหนัก 10 กรัม บดรวมกับสารละลายโปแตสเซียมคลอไรด์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.6 M ปริมาตร 200 มิลลิลิตร นาน 4 นาที
2. เทสารละลายที่ได้ใส่ในบีกเกอร์ ตั้งทิ้งไว้ในอ่างน้ำแข็งเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
3. นำมาเหวี่ยงแยก ที่อุณหภูมิ 0-5 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วรอบ 3,600 rpm นาน 30 นาที 3 ครั้ง
4. บีบอัดสารละลายใสมา 20 มิลลิลิตร นำมาย่อยด้วยกรดซัลฟิวริก ตามวิธีในภาคผนวก ก. 2

การคำนวณ

น้ำหนักของตัวอย่างที่นำไปย่อยด้วยกรดซัลฟิวริก ตามวิธีในภาคผนวก ก. 2 หาได้ดังนี้

$$W_{\text{sspN}} = W_2 \times \frac{20}{W_2 + 200}$$

Pre test speed : 2 มิลลิเมตรต่อวินาที

Test speed : 2 มิลลิเมตรต่อวินาที

Post test speed : 2 มิลลิเมตรต่อวินาที

Distance : 25 มิลลิเมตร

4. วางตัวอย่างบนแท่นวาง โดยให้ตัวอย่างอยู่ตรงกลางแท่น
5. กดปุ่ม run a test เพื่อให้ใบมีดเลื่อนลงมาที่ตัวอย่างจนกระทั่งตัวอย่างขาดออกจากกัน โดยค่าแรงที่สูงที่สุดค่าแรก (maximum force) ที่อ่านได้จากกราฟ คือค่าแรงต้านทานการตัดขาด (cutting force) ของตัวอย่าง

ก.10 การหาเวลาและอัตราเร็วที่ใช้ในการแซ่เยือกแข็ง (ดัดแปลงจาก Pan and Yeh, 1993)

การหาเวลาที่ใช้ในการแซ่เยือกแข็ง

ทั้งสองวิธีของการแซ่เยือกแข็งจะมีวิธีหาเวลาที่ใช้ในการแซ่เยือกแข็งเดียวกันคือ เสียบเทอร์โมคัปเปิล Type-T เข้าไปยังบริเวณจุดกึ่งกลางของปล้องที่ 2 ของกึ่งกลาดำ บันทึกอุณหภูมิด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิโดยบันทึกอุณหภูมิเริ่มต้นของกึ่งกลาดำ (ซึ่งจะควบคุมให้อยู่ที่ประมาณ 20 องศาเซลเซียส) และเวลาจนอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของกึ่งกลาดำมีค่าประมาณ -18 องศาเซลเซียส

การหาอัตราเร็วที่ใช้ในการแซ่เยือกแข็ง

ทั้งสองวิธีของการแซ่เยือกแข็งจะมีวิธีหาอัตราเร็วที่ใช้ในการแซ่เยือกแข็งเดียวกันคือ

1. วัดระยะทางจากผิวหน้าของกึ่งไปจนถึงบริเวณจุดกึ่งกลางของปล้องที่ 2 (โดยเป็นระยะทางที่สั้นที่สุด) หน่วยเป็นเซนติเมตร บันทึกค่าที่ได้ (M_1)
2. จับเวลาที่ใช้ไปในการแซ่เยือกแข็งกึ่งตั้งแต่อุณหภูมิเริ่มต้นของกึ่งกลาดำจนกระทั่งอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของกึ่งกลาดำมีค่าประมาณ -18 องศาเซลเซียส หน่วยเป็นชั่วโมงบันทึกค่าที่ได้ (M_2)

$$\text{อัตราเร็วที่ใช้ในการแซ่เยือกแข็ง} = \frac{M_1}{M_2}$$

(เซนติเมตร / ชั่วโมง)

ก.11 การหาค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็ง (% Freezing loss)
(ดัดแปลงจาก AOAC(1995) section 39.1.02 B)

วิธีการ

1. ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของผลิตภัณฑ์ก่อนการแช่เยือกแข็ง บันทึกค่าที่ได้ (M_3)
2. ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของผลิตภัณฑ์หลังการแช่เยือกแข็ง บันทึกค่าที่ได้ (M_4)

วิธีคำนวณ

$$\% \text{ Freezing loss} = \frac{M_3 - M_4}{M_3} \times 100$$

ก.12 การหาค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็ง (%Thawing loss)
(ดัดแปลงจาก AOAC(1995) section 39.1.02 B)

วิธีการ

1. ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของผลิตภัณฑ์ก่อนการละลายน้ำแข็ง บันทึกค่าที่ได้ (M_5)
2. ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของผลิตภัณฑ์หลังการละลายน้ำแข็ง บันทึกค่าที่ได้ (M_6)

วิธีคำนวณ

$$\% \text{ Thawing loss} = \frac{M_5 - M_6}{M_5} \times 100$$

ก.13 การวิเคราะห์ลักษณะทางเนื้อเยื่อด้วยวิธีทาง Histology (ดัดแปลงจาก Pan และ Yeh (1993) และตามวิธีของภาควิชาพยาธิวิทยาเขตร้อน คณะเวชศาสตร์เขตร้อน มหาวิทยาลัยมหิดล)

อุปกรณ์

1. กล้องจุลทรรศน์ (Nikon, UFX-DX)
2. กล้องถ่ายรูปที่ต่อเข้ากับกล้องจุลทรรศน์ (Nikon, FX-35 DX)

วิธีการ

1. Cutting

ตัดชิ้นกึ่งให้มีขนาดบางด้วยมีดผ่าตัดเบอร์ 23 หนาให้เป็นแว่นบริเวณกึ่งกลางของปล้องที่ 2

2. Fixation

เป็นการรักษาเนื้อเยื่อให้หยุดปฏิกิริยาภายในเซลล์โดย fix ตัวอย่างใน 10% buffered neutral formalin สำหรับกึ่งจะ fix ใน Bouin's solution เพิ่มด้วยเพื่อให้การย้อมสีติดดีขึ้น

3. Dehydration

เป็นการแทนที่น้ำภายในเซลล์ด้วย ethyl alcohol โดยเพิ่มความเข้มข้นของ ethyl alcohol เริ่มต้นจาก 80% และค่อยๆเพิ่มจนเป็น 100 %

3. Clearing

หลังจากผ่านการ dehydration จะแทนที่ alcohol ด้วยตัวทำละลายที่สามารถละลายผสมกันได้กับ embedding medium สำหรับการทำให้ paraffin embedding จะใช้ chloroform หรือ xylene

5. Infiltration

เป็นการแทนที่ clearing reagent ด้วย paraffin เพื่อให้เซลล์ตลอดจนองค์ประกอบภายในเซลล์คงรูปอยู่ได้ขณะตัด section

6. Embedding

เป็นการฝังตัวอย่างลงใน paraffin เมื่อ paraffin แข็งตัวจะช่วยรักษาเซลล์ให้คงรูป

7. Sectioning

เป็นการตัดตัวอย่างให้มีความหนา 4-6 ไมครอน ด้วย microtome ตัวอย่างที่ผ่านการตัดจะลอยในน้ำอุ่นและย้ายมาวางบนแผ่นสไลด์

8. Staining

ย้อมสีตัวอย่าง โดยใช้ Hematoxylin และ Eosin (H&E) Hematoxylin จะย้อมเซลล์ นิวเคลียส และ acidic structure อื่นๆ โดยให้สีน้ำเงิน ส่วน Eosin จะย้อม cytoplasm และ collagen โดยให้สีชมพู

9. Mounting

ปิดสไลด์เนื้อเยื่อด้วย cover glass เพื่อป้องกันการเสียหายของเนื้อเยื่อ

การเตรียมสีย้อม Hematoxylin และ Eosin (H&E)

1. Harris's hematoxylin

Hematoxylin	5.0 กรัม
Alcohol 100 %	50.0 มิลลิลิตร
Ammonium หรือ Potassium alum	100.0 กรัม
น้ำกลั่น	1,000.0 มิลลิลิตร
Mercuric oxide	2.5 กรัม

2. 1% Stock Alcoholic Eosin Y

Eosin Y, water soluble	1.0 กรัม
น้ำกลั่น	20.0 มิลลิลิตร
Alcohol 95 %	80.0 มิลลิลิตร

ก.14 การวิเคราะห์ลักษณะทางเนื้อเยื่อด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) (ตามวิธีของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

อุปกรณ์ 1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL รุ่น JSM – 5410 LV)
ปริ้นท์รูปด้วย SONY, video graphic printer UP-880

วิธีการ

- ตัดชิ้นกึ่งให้มีขนาดบางด้วยมีดผ่าตัดเบอร์ 23 หนึ่งให้เป็นแวนบริเวณกึ่งกลางของปล้องที่ 2
- แช่ตัวอย่าง (pre-fix) ใน 0.1 M phosphate buffer pH 7.2 ที่มี glutaraldehyde ผสมอยู่ 2.5 % นาน 3 ชั่วโมง หรือข้ามคืนในตู้เย็น
- ล้างด้วย phosphate buffer 3 ครั้ง ครั้งละ 10-15 นาที
- แช่ตัวอย่าง (post-fix) ใน 0.1 M phosphate buffer pH 7.2 ที่มี OsO₄ ผสมอยู่ 1% หรือน้ำกลั่น นาน 1-2 ชั่วโมง
- ล้างด้วย phosphate buffer หรือน้ำกลั่น 3 ครั้ง ครั้งละ 10-15 นาที
- ขจัดน้ำออกจากตัวอย่าง (dehydrate) ด้วย ethanol หรือ acetone ที่ความเข้มข้น 30% 50% 70% 90% และ 100% (2 ครั้ง) ตามลำดับ ขั้นตอนละ 10-15 นาที
- ทำตัวอย่างให้แห้ง ณ จุดวิกฤตด้วยเครื่องทำให้แห้ง (critical point dryer)
- ติดตัวอย่างบนฐานรองตัวอย่าง (stub) ด้วยเทป 2 หน้าหรือกาว
- นำตัวอย่างไปฉาบด้วยเครื่องฉาบทอง (ion sputter)
- นำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ข. 1 การหาอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งกุ้งกุลาดำด้วยวิธีแบบลมพ่นที่ระดับความเร็วลมต่างๆ

ตารางที่ ข. 1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งกุ้งกุลาดำด้วยวิธีแบบลมพ่นที่ระดับความเร็วลมต่างๆ

SOV	df	MS	F
Between groups	2	0.399	28.740 *
Within groups	9	0.01387	
Total	11		

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ข. 2 การหาค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นที่ระดับความเร็วลมต่างๆ

ตารางที่ ข. 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นที่ระดับความเร็วลมต่างๆ

SOV	df	MS	F
Between groups	2	1.686	11.081*
Within groups	9	0.152	
Total	11		

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

**ข. 3 การหาค่าแรงต้านทานการตัดขาดของกึ่งกลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบ
ลมพ่นที่ระดับความเร็วลมต่างๆ**

ตารางที่ ข.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าแรงต้านทานการตัดขาดของกึ่ง
กลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นที่ระดับความเร็วลมต่างๆ

SOV	df	MS	F
Between groups	3	7.290	28.593 *
Within groups	12	0.255	
Total	15		

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

**ข. 4 การหาอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งกึ่งกลาดำด้วยวิธีแบบโครโอจินิคที่ระดับ
อุณหภูมิต่างๆ**

ตารางที่ ข. 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งกึ่งกลาดำ
ด้วยวิธีแบบโครโอจินิคที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

SOV	df	MS	F
Between groups	3	80.941	30.298 *
Within groups	12	2.672	
Total	15		

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ข. 5 การหาค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิกที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ ข.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิกที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

SOV	df	MS	F
Between groups	3	0.0072	1.107
Within groups	12	0.0065	
Total	15		

ข. 6 การหาค่าแรงต้านทานการตัดขาดของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิกที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ ข.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าแรงต้านทานการตัดขาดของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิกที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

SOV	df	MS	F
Between groups	4	15.878	38.872 *
Within groups	15	0.408	
Total	19		

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ข. 7 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่า TBA ของกุ่มกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้ว

ตารางที่ ข.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่า TBA ของกุ่มกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเพื่อศึกษาผลของวิธีละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ

SOV	df	MS	F
วิธีการละลายน้ำแข็ง (A)	1	0.0014 *	5.077 *
การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ (B)	4	0.0259 *	91.020 *
A* B	4	0.00018	0.630
Error	10	0.00028	

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ข. 8 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่า TBA ของกุ่มกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้ว

ตารางที่ ข.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่า TBA ของกุ่มกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเพื่อศึกษาผลของวิธีละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ

SOV	df	MS	F
วิธีการละลายน้ำแข็ง (A)	1	0.00698 *	22.139 *
การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ (B)	4	0.0238 *	75.548 *
A* B	4	0.00059	1.884
Error	10	0.00032	

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ข. 9 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้ของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้ว

ตารางที่ ข.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้ของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเพื่อศึกษาผลของวิธีละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ

SOV	df	MS	F
วิธีการละลายน้ำแข็ง (A)	1	0.149 *	9.792 *
การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ (B)	4	12.711 *	834.637 *
A* B	4	0.145 *	9.502 *
Error	10	0.015	

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ข. 10 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้ของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้ว

ตารางที่ ข.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของปริมาณต่างทั้งหมดที่ระเหยได้ของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเพื่อศึกษาผลของวิธีละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ

SOV	df	MS	F
วิธีการละลายน้ำแข็ง (A)	1	0.710 *	107.593 *
การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ (B)	4	11.973 *	1813.735 *
A* B	4	0.186 *	28.240 *
Error	10	0.007	

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ข. 11 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของกุ่มกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้ว

ตารางที่ ข.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าความเป็นกรด-ด่างของกุ่มกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเพื่อศึกษาผลของวิธีละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ

SOV	df	MS	F
วิธีการละลายน้ำแข็ง (A)	1	0.022	3.204
การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ (B)	4	0.027 *	3.894 *
A* B	4	0.003	0.417
Error	10	0.007	

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ข. 12 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของกุ่มกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้ว

ตารางที่ ข.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าความเป็นกรด-ด่างของกุ่มกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเพื่อศึกษาผลของวิธีละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ

SOV	df	MS	F
วิธีการละลายน้ำแข็ง (A)	1	0.001	0.212
การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ (B)	4	0.019 *	3.602 *
A* B	4	0.002	0.360
Error	10	0.005	

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ข. 13 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือของ กุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้ว

ตารางที่ ข.13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเพื่อศึกษาผลของวิธีละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ

SOV	df	MS	F
วิธีการละลายน้ำแข็ง (A)	1	0.041	0.116
การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ (B)	4	2.859 *	7.982 *
A* B	4	0.333	0.930
Error	10	0.358	

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ข. 14 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้ว

ตารางที่ ข.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือของกุ้งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเพื่อศึกษาผลของวิธีละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ

SOV	df	MS	F
วิธีการละลายน้ำแข็ง (A)	1	1.512	2.991
การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ (B)	4	3.789 *	7.493 *
A* B	4	0.319	0.631
Error	10	0.506	

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ข. 15 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลาย น้ำแข็งของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือก แล้ว

ตารางที่ ข.15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็งของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตาม ภาวะที่คัดเลือกแล้วเพื่อศึกษาผลของวิธีละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การ ละลายน้ำแข็งซ้ำ

SOV	df	MS	F
วิธีการละลาย น้ำแข็ง (A)	1	14.956 *	1879.289 *
การแช่เยือกแข็ง-การ ละลายน้ำแข็งซ้ำ (B)	4	29.153 *	3663.218 *
A* B	4	1.370 *	172.107 *
Error	10	0.0080	

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ข. 16 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลาย น้ำแข็งของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้ว

ตารางที่ ข.16 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็งของกึ่งกูลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจินิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเพื่อศึกษาผลของวิธีละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ

SOV	df	MS	F
วิธีการละลาย น้ำแข็ง (A)	1	8.463 *	1008.101 *
การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ (B)	4	5.504 *	655.631 *
A* B	4	0.835 *	99.459 *
Error	10	0.0084	

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ข. 17 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าแรงต้านทานการตัดขาดของกึ่งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้ว

ตารางที่ ข.17 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าแรงต้านทานการตัดขาดของกึ่งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเพื่อศึกษาผลของวิธีละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ

SOV	df	MS	F
วิธีการละลายน้ำแข็ง (A)	1	4.221	3.228
การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ (B)	4	6.211*	4.750 *
A* B	4	0.272	0.208
Error	10	1.308	

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ข. 18 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าแรงต้านทานการตัดขาดของกึ่งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจีนิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้ว

ตารางที่ ข.18 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าแรงต้านทานการตัดขาดของกึ่งกุลาดำที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบโครโอจีนิคตามภาวะที่คัดเลือกแล้วเพื่อศึกษาผลของวิธีละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ

SOV	df	MS	F
วิธีการละลายน้ำแข็ง (A)	1	2.663	4.194
การแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ (B)	4	3.338 *	5.257 *
A* B	4	0.231	0.363
Error	10	0.635	

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศิรินทรา บุญสำเร็จ เกิดเมื่อวันที่ 3 ธันวาคม พ.ศ. 2520 ในจังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541

ผลงานทางวิชาการ

- สายวรूप ชัยวานิชศิริ, สุเมธ ตันตระเธียร และ ศิรินทรา บุญสำเร็จ.
ผลของกระบวนการแช่เยือกแข็งต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon*) ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นและแบบไครโอจีนิก. การเสนอผลงานวิชาการแบบโปสเตอร์. การประชุมวิชาการ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27. 16-18 ตุลาคม 2544.
สงขลา: คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย