



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การถนอมอาหารโดยใช้กระบวนการความดันสูง

โดย ดร. จารุพรรณ กุลดิลก และคณะ

มิถุนายน ๒๕๕๘



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การถนอมอาหารโดยใช้กระบวนการความดันสูง

โดย ดร. จารุพรรณ กุลดิลก และคณะ

มิถุนายน ๒๕๔๘

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การถนอมอาหารโดยใช้กระบวนการความดันสูง

คณะผู้วิจัย

- ดร. จารุพรรณ กุลดิลก
- ผศ. ดร. ธนากร อ้วนอ่อน
- Prof. Dr. Mohammad Eshtiaghi

สังกัด

มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยมหิดล
Berlin University of Technology

สนับสนุนโดยทบวงมหาวิทยาลัย และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย ทบวงฯ และสกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

Executive Summary

High-Pressure Processing on Food Preservation

1. Motivation

Nowadays, the method of food processing is depending on heat treatment, which control level of food contaminant, micro-organisms and toxin. However, this method devalues nutrition and freshness of natural food. Therefore, food additives (starch, sugar, synthetic flavors, synthetic colours and vitamins) are essential subjecting to the final products.

But one has to be aware that limitation of synthetic additives are great concerned. Researchers are now trying to develop their techniques of producing food products in order to reduce amount of those food additives. In Europe, new methods of food production (other methods apart from heat treatment) are becoming the most popular topic. Since they cannot supply much fresh food, they are trying to prolong its life with the freshness and full of nutrition without adding the additives. In very near future the new methods will substitute the conventional one and foods are required to follow the standard of food quality before distribute to the world market. This standard can be met when the right methods are applied to the food productions.

Recently, high pressure has demonstrated its wide applicability for producing high quality foods, such as food sterilizing and food freezing. It is now accepted as an attractive alternative to heating methods. If pressure goes up, chemical reactions take place so that the system takes up less volume. The difference between this response and what happens when the same system is heat-treated comes down to which types of chemical bonds are broken. Heat breaks covalent bonds, which hold atoms together as molecules. This is why heat alters the flavor of foods. By contrast, high pressure affects only a few covalent bonds, which exist between electrically charged chemical groups. As pressure rise, water molecules flow between the positively and negatively charged groups and bind to them because this reduces the volume of the system. The influx of water breaks the bonds in two. Ionic bonds, keep the chain-like structures of protein molecules in their biologically active form. Once these are broken, the proteins unravel and become useless. Whether it is this mechanism that finishes off bacteria cells is still a matter of debate, but there is a majority view. For vegetative microbes,

pressure damages the cell membrane. When the cell cannot repair the damage and the cell contents are lost, reproduction ceases.

In Europe, America and Japan, the technique is right now being tried on everything from meat and dairy products to fruit and vegetables in the hope that this kind of preservation will finally help to stem the tide of food poisoning and preserve the freshness of food.

So far the signs are that it will be relatively easy to kill vegetative micro-organisms such as *E.coli* (e.g. beef contamination), which reproduce by dividing. In Japan, for example, the delight of pressure-treated fresh-tasting fruit jams and yogurts are already becoming popular delicate. High-Pressure food products continue to increase in the country. In Europe, high pressure freezing can help preserve nutrition and freshness of frozen chicken and seafood.

Among contributions to Thai economics, frozen food is a great majority of food export, especially prawn. However, the tender of frozen prawn still cannot be met to the customer satisfaction. High-pressure technique may solve this problem. So far, there is no high-pressure unit available in Thailand. Thus, it will be a great advantage if this technique will be built up and examined on the prawn. This will consequently build new knowledge base and will encourage further study on food preservation in the future.

2. Objectives

2.1 Design and construct a high-pressure unit for food freezing.

2.2 Develop the implication of high pressure freezing on frozen prawn.

3. Research methodology

3.1 Building up high-pressure unit, which includes thick-wall-vessels with seal plugs and compression systems for pressure transmitting fluids.

3.2 Organizing high-pressure experiment on the frozen prawn and monitoring its tenderizing (water amount after thawing).

3.3 Evaluating the results of high-pressure in food production and determining the potential of high-pressure technique on the frozen prawn as well as improving the pilot plant for better quality and safety.

4. Research plan

Month	Activities
1-6	- Designing and building up high-pressure vessel with compression system. - Adding sensors to high-pressure unit and connecting to computing processor.
7-12	- Testing equipment stability and process replication ability. - Experimenting high-pressure freezing on selected Thai prawn. - Evaluating the tenderizing of frozen prawn according to high-pressure effects. - Documenting the output and writing up two journals concerning high-pressure effect on food and technique of setting up high-pressure unit for food treatment. - Registering the patent of high-pressure equipment for food processing. - Summarizing the annual report of high-pressure method on food preservation and equipment development. - Writing up a journal about high-pressure equipment for food freezing.
13-18	- Investigating the effect of high-pressure on ice grain. - Summarizing and characterizing pressure-temperature-time model on the freezing process. - Monitoring shelf-life of treated food.
19-24	- Writing up a journal about effect of high-pressure treatment on frozen prawn. - Evaluating the potential of high-pressure preservation on frozen food. - Summarizing the project report of overall experiment, determining further study and project development.

5. Expected publications

Year 1: Expected topic: High Pressure Equipment for Seafood Freezing

Journal: Journal of Food Engineering (0.823)

Year 2: Expected topic: The Effect of High-Pressure Treatment on Frozen Prawn

Journal: Journal of Food Engineering (0.823)

6. Budget

	Year 1	Year 2	Total
1. Professional fee (ค่าตอบแทน)			
- Researcher	120,000	120,000	240,000
2. Materials (วัสดุ)			
- Stainless steel for high pressure vessel	30,000		30,000
- Hydraulic pump	40,000		40,000
- Vessel construction	30,000		30,000
- Prawn	10,000	60,000	70,000
- Packaging materials	5,000	30,000	35,000
3. Miscellaneous (เบ็ดเตล็ด)			
- Journal issuing	5,000	5,000	10,000
- Document printing		5,000	5,000
- Maintenance		20,000	20,000
Total budget	240,000	240,000	480,000

7. Output and Discussion

Frozen shrimp preservation was carried out by high pressure unit. Homogeneous and small ice crystal was induced throughout the cell because of high pressure. This can decrease the problem of cell destruction and the long of thawing time. The experiment were divided into 2 parts: 1.

conventional freezing and thawing at 15, 30 , 45 minutes compared with high pressure thawing at 500, 1000, 1500, 2000 bar in order to determine the suitable thawing time and types of shrimps. 2. High pressure freezing and the conventional thawing, which can compare the drip loss as well as the cell destruction.

The result of conventional freezing and thawing was shown that drip loss after thawing at 30°C, 15 minutes with subsequent boiling at 80°C, 5 minutes was at minimum comparing to with thawing time duration 30 and 45 minutes.

The result of high pressure freezing has shown that the high pressure can reduce thawing time and accordingly maintain the good quality. The high pressure freezing of unpeeled and peeled shrimp at 2000 bar showed the reduction of cell destruction and drip loss comparing to the conventional freezing and thawing shrimp.

This method is an alternative and key method for food freezing in very near future. Therefore, it should be investigated further on shelf-life as well as in combination means with other methods. It would be also interesting to have the experiment on various kinds of food, microbial and enzymes.

รายละเอียดโครงการ

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย): การถนอมอาหาร โดยใช้กระบวนการความดันสูง
(ภาษาอังกฤษ): High Pressure Processing on Food Preservation

ชื่อหัวหน้าโครงการ (ภาษาไทย): นางสาว จารุพรรณ กุลดิลก
(ภาษาอังกฤษ): Miss Jarupan Kuldiloke
(ตำแหน่งวิชาการ): อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี

ระยะเวลาดำเนินงาน: 2 ปี

เวลาทำงานวิจัยในโครงการประมาณสัปดาห์ละ 20 ชั่วโมง/สัปดาห์
สถานที่ติดต่อ:

ที่ทำงาน	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ศาลายา จ. นครปฐม 73170
โทรศัพท์	02-889-2138 ต่อ 6111, 6101
โทรสาร	02-889-2138 ต่อ 6129
e-mail	egikd@mahidol.ac.th , jkuldiloke@hotmail.com

นักวิจัยที่ปรึกษา (ภาษาไทย): นาย ธนากร อ้วนอ่อน
(ภาษาอังกฤษ): Mr. Thanakorn Auan-Orn
(ตำแหน่งวิชาการ): ผู้ช่วยศาสตราจารย์

สถานที่ติดต่อ:

ที่ทำงาน	คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ศาลายา จ. นครปฐม 73170
โทรศัพท์	02-889-2138 ต่อ 6000
โทรสาร	02-441-9731
e-mail	dcaneg@mahidol.ac.th

ชื่ออธิการบดี

นาย พรชัย มาตังคสมบัติ

การเปิดบัญชีโครงการ

ชื่อบัญชีโครงการ	MRG46-จารุพรรณ กุลดิลก
เลขที่บัญชี	333-2-12699-4
ธนาคาร	ไทยพาณิชย์ จำกัด (มหาชน)
สาขา	สาขาย่อย ม.มหิดล
ผู้มีอำนาจส่งจ่าย	1. นางสาวจารุพรรณ กุลดิลก (หัวหน้าโครงการ)
	2. นางฉวีวรรณ ยศวัฒน์ (อาจารย์)
	3. นางกชจิรา ศิวอำพันธ์ (เจ้าหน้าที่การเงิน)

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำโครงการวิศวกรรมนี้ ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนากร อ้วนอ่อนเป็นอย่างสูง สำหรับคำปรึกษา ข้อเสนอแนะ รวมถึงความช่วยเหลือเพื่อให้การทดลองประสบผลสำเร็จด้วยดี

ขอขอบคุณ Prof. Mohammad Eshtiaghi ที่ช่วยสละเวลาให้คำแนะนำ รวมทั้งคุณ โอภาส และคุณรักทรง ที่ช่วยติดตั้งเครื่องมือ อุปกรณ์ และให้ความช่วยเหลือ จนกระทั่งการทดลองสำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดลที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ อุปกรณ์ เครื่องมือ วัสดุ และสถานที่

ท้ายสุดขอขอบพระคุณทบวงมหาวิทยาลัยและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

จารุพรรณ กุลดิลกและคณะ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการถนอมกุ้งโดยอาศัยเทคนิคความดันสูงมาใช้ ซึ่งความดันจะช่วยให้เกิดผลึกน้ำแข็งเร็วและเป็นผลึกขนาดเล็ก ซึ่งทำให้เซลล์อาหารถูกทำลายน้อยลง อีกทั้งยังช่วยลดเวลาในการแช่แข็งและการละลาย โดยงานวิจัยจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ 1. การแช่แข็ง (-20 องศาเซลเซียส) และการละลายกุ้งด้วยวิธีดั้งเดิม โดยแช่แข็งเป็นเวลา 1 คืนและทำการละลายที่เวลา 15, 30 และ 45 นาที เปรียบเทียบกับการละลายกุ้งด้วยวิธีความดันสูงที่ 500 1,000 1,500 และ 2,000 บาร์ เพื่อหาเวลาการละลายและขนาดของกุ้งที่เหมาะสม 2.การแช่แข็งกุ้งด้วยความดันสูง แล้วนำมาละลายด้วยวิธีดั้งเดิม เพื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่สูญเสียหลังการละลายและหลังการต้ม รวมถึงเปรียบเทียบโครงสร้างของตัวกุ้งที่ผ่านการแช่แข็งแบบดั้งเดิมและแบบใช้ความดันสูง

ผลการทดลองการแช่แข็งและการละลายด้วยวิธีดั้งเดิมพบว่า การละลายที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลาละลาย 15 นาที และการต้มที่ 80 องศาเซลเซียส เวลา 5 นาที มีปริมาณน้ำที่สูญเสียทั้งหมด (drip loss) น้อยที่สุดเทียบกับเวลาละลาย 30 และ 45 นาที ส่วนการละลายด้วยความดันสูงที่อุณหภูมิเดียวกัน ช่วยลดเวลาการละลายได้ ซึ่งเป็นการช่วยรักษาคุณภาพของกุ้งได้ดีกว่าการละลายแบบดั้งเดิมที่ใช้เวลาละลายนาน กุ้งแบบมีเปลือกและไร้เปลือกที่ผ่านการแช่แข็งด้วยความดันสูงที่ 2000 บาร์พบว่าเซลล์ถูกทำลายน้อยกว่ากุ้งที่แช่แข็งแบบดั้งเดิมและมีปริมาณน้ำสูญเสียน้อยกว่ากุ้งที่ผ่านการแช่แข็งและการละลายด้วยวิธีดั้งเดิม

ABSTRACT

This research was the shrimp preservation by high pressure unit. Homogeneous and small ice crystal was induced throughout the cell because of high pressure. This can decrease the problem of cell destruction and the long of thawing time. The experiment were divided into 2 parts: 1. conventional freezing and thawing at 15, 30 , 45 minutes compared with high pressure thawing at 500, 1000, 1500, 2000 bar in order to determine the suitable thawing time and types of shrimps. 2. High pressure freezing and the conventional thawing, which can compare the drip loss as well as the cell destruction.

The result of conventional freezing and thawing showed that the drip loss after thawing at 30°C, 15 minutes with subsequent boiling at 80°C, 5 minutes was at minimum comparing to with thawing time duration 30 and 45 minutes.

The result of high pressure freezing has shown that the high pressure can reduce thawing time and accordingly maintain the good quality. The high pressure freezing of unpeeled and peeled shrimp at 2000 bar showed the reduction of cell destruction and drip loss comparing to the conventional freezing and thawing shrimp.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญภาพ	ช
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2. ทบทวนวรรณกรรม	
2.1 ทฤษฎี	
2.1.1 คุณสมบัติของอาหารแช่แข็ง	3
2.1.2 กระบวนการแช่แข็ง	5
2.1.3 เทคโนโลยีความดันสูง	15
2.1.4 การวัดคุณภาพอาหารที่ผ่านกระบวนการแช่แข็ง	27
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
3. ระเบียบวิธีวิจัย	
3.1 การเตรียมวัตถุดิบ	30
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	30
3.3 สารเคมี	31
3.4 การอบแห้งด้วยตู้อบ	31
3.5 การทดลองการแช่แข็งแบบดั้งเดิม	31

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 ส่วนประกอบของถังทนความดันสูง	32
3.7 การทดสอบเครื่องถนอมอาหารความดันสูง	34
4. ผลการวิจัย	
4.1 การทดลองการแช่แข็ง และการละลายด้วยวิธีดั้งเดิม	37
4.2 ผลการทดสอบเครื่องถนอมอาหารความดันสูง	40
4.3 การทดสอบการละลายด้วยถังความดันสูง	42
4.4 ผลการทดลองปริมาณน้ำที่สูญเสีย (drip loss)	50
4.5 ผลการส่องกล้องด้วย SEM (Scanning Electron Microscopes)	53
5. อภิปรายผล	
5.1 การทดลองการแช่แข็ง และการละลายด้วยวิธีดั้งเดิม	55
5.2 การทดลองการแช่แข็งด้วยวิธีธรรมดา แล้วละลายที่ความดันสูง	56
5.3 เครื่องถนอมอาหารด้วยความดันสูง	56
5.4 การทดสอบเครื่องถนอมอาหารความดันสูง	57
5.5 ผลการส่องกล้องด้วย SEM (Scanning Electron Microscopes)	57
6. สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุปผลงานวิจัย	59
6.2 ปัญหาที่พบระหว่างการทดลอง	60
6.3 ข้อเสนอแนะ	63
6.4 Output ที่ได้จากโครงการ	64
รายการอ้างอิง	65
ภาคผนวก ก การคำนวณหาค่าปริมาณน้ำที่สูญเสีย (drip loss)	67
ภาคผนวก ข Composition of High Pressure vessel	69
ภาคผนวก ค Manuscript แลพ บทความสำหรับการเผยแพร่	77

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้ง (dry matter) ของกิ่งขนาดต่างๆ	37
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำที่สูญเสีย (drip loss) ของการทดลองด้วยวิธีดั้งเดิม ที่เวลาการ ละลาย 15 นาที	38
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำที่สูญเสีย (drip loss) ของการทดลองด้วยวิธีดั้งเดิม ที่เวลาการ ละลาย 30 นาที	38
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำที่สูญเสีย (drip loss) ของการทดลองด้วยวิธีดั้งเดิม ที่เวลาการ ละลาย 45 นาที	39
ตารางที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ความดันต่างๆ	40
ตารางที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ	41
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งของกิ่งที่ใช้ในการทดลองการละลายด้วยความดันสูง	42
ตารางที่ 4.8 แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำสูญเสีย (drip loss) ของการละลายด้วยความดันสูง โดยใช้เวลา ในการละลาย 10 นาที	43
ตารางที่ 4.9 แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำสูญเสีย (drip loss) ของการละลายด้วยความดันสูง โดยใช้เวลา ในการละลาย 5 นาที	44
ตารางที่ 4.10 แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำสูญเสีย (drip loss) ของการละลายด้วยความดันสูง โดยใช้เวลา ในการละลาย 4 นาที	46
ตารางที่ 4.11 แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำสูญเสีย (drip loss) ของการละลายด้วยความดันสูง โดยใช้เวลา ในการละลาย 3 นาที	47
ตารางที่ 4.12 แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำสูญเสีย (drip loss) ของการละลายด้วยความดันสูง โดยใช้เวลา ในการละลาย 2 นาที	49
ตารางที่ 4.13 แสดงค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้ง (dry matter) ของกิ่งขนาดต่างๆ	50
ตารางที่ 4.14 แสดงผลการละลายของกิ่งที่แช่แข็งด้วยวิธีธรรมดาเทียบกับกิ่งที่แช่แข็งด้วยความดันสูง แล้วนำมาละลายด้วยวิธีดั้งเดิม ที่ -20 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	51

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงความหนาแน่นของน้ำและน้ำแข็ง	4
รูปที่ 2.2 แสดงแผนภาพเฟสที่แสดงสถานะต่างๆของน้ำ	7
รูปที่ 2.3 แสดงอัตราการเพิ่มขนาดผลึกและก่อนิวเคลียสผลึก	10
รูปที่ 2.4 แสดงการเกิดผลึกน้ำแข็งโดยการแช่เยือกแข็งในเซลล์เนื้อเยื่อ	12
รูปที่ 2.5 แสดงแผนภูมิการเปลี่ยนสถานะของน้ำที่ความดันต่างๆ	17
รูปที่ 2.6 แสดงแผนภูมิการแช่แข็งและการละลายด้วยความดันสูง	18
รูปที่ 2.7 แสดงกระบวนการแช่แข็งโดยความดันสูง	19
รูปที่ 2.8 แสดงการเปลี่ยนสถานะของน้ำไปเป็นน้ำแข็งที่ความดันต่างๆ	19
รูปที่ 2.9 แสดงการเปลี่ยนสถานะความดัน และอุณหภูมิในการแช่แข็ง	20
รูปที่ 2.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะความดัน และอุณหภูมิในการละลาย	23
รูปที่ 2.11 แสดงอุปกรณ์ของระบบความดันสูง	26
รูปที่ 2.12 แสดงเครื่องความดันสูงแบบ autoclave แบบเปิดอย่างรวดเร็ว	26
รูปที่ 3.1 แสดงแบบของเครื่องถนอมอาหารด้วยความดันสูง	32
รูปที่ 3.2 แสดงภาพถ่ายจริงของเครื่องความดันสูงเทียบกับภาพต้นแบบ	33
รูปที่ 3.3 แสดงเครื่องถนอมอาหารความดันสูง	34
รูปที่ 3.4 แสดงตู้แช่แข็งแบบดั้งเดิม	34
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ความดันต่างๆ	40
รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา	41
รูปที่ 4.3 แสดงค่าปริมาณน้ำสูญเสียทั้งหมด (Total drip loss) ที่ความดันต่างๆ โดยใช้เวลาการละลายเท่ากันที่ 10 นาที	44
รูปที่ 4.4 แสดงค่าปริมาณน้ำสูญเสียทั้งหมด (Total drip loss) ที่ความดันต่างๆ โดยใช้เวลาการละลายเท่ากันที่ 5 นาที	45
รูปที่ 4.5 แสดงค่าปริมาณน้ำสูญเสียทั้งหมด (Total drip loss) ที่ความดันต่างๆ โดยใช้เวลาการละลายเท่ากันที่ 4 นาที	47
รูปที่ 4.6 แสดงค่าปริมาณน้ำสูญเสียทั้งหมด (Total drip loss) ที่ความดันต่างๆ โดยใช้เวลาการละลายเท่ากันที่ 3 นาที	48
รูปที่ 4.7 แสดงค่าปริมาณน้ำสูญเสียทั้งหมด (Total drip loss) ที่ความดันต่างๆ โดยใช้เวลาการละลายเท่ากันที่ 2 นาที	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.8 แสดงปริมาณน้ำสูญเสียทั้งหมดของการแช่แข็งแบบดั้งเดิมและแบบความดันสูง	52
รูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างของกึ่งมีเปลือกที่ผ่านการแช่แข็งด้วยความดันสูง	53
รูปที่ 4.10 แสดงโครงสร้างของกึ่งมีเปลือกที่ผ่านการแช่แข็งด้วยวิธีดั้งเดิม	53
รูปที่ 4.11 แสดงโครงสร้างของกึ่งไร้เปลือกที่ผ่านการแช่แข็งด้วยความดันสูง	54
รูปที่ 4.12 แสดงโครงสร้างของกึ่งไร้เปลือกที่ผ่านการแช่แข็งด้วยวิธีธรรมดา	54
รูปที่ 6.1 แสดงผลถึงความดันสูงพร้อมประเด็นที่ขยายตัว	60
รูปที่ 6.2 แสดงประเด็นซูเปอร์สปีนที่ขยายตัวเทียบกับปกติ	61
รูปที่ 6.3 ประเด็นชนิดทองเหลือง	61
รูปที่ 6.4 ประเด็นชนิดทองแดง	61
รูปที่ 6.5 แสดงซีล (O-ring) สีดำที่เกิดความเสียหาย	62
รูปที่ 6.6 แสดงซีลสีขาวและสีดำ	62
รูปที่ 6.7 แสดงระบบที่ความดัน 2000 บาร์ และ -20 องศาเซลเซียส	63

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ประเทศไทยมีโรงงานการแช่แข็งขนาดใหญ่ที่ประกอบกิจการในระดับประเทศหลายโรงงาน ส่วนใหญ่เป็นปลา กุ้ง และปลาหมึกแช่แข็ง วิธีส่งออกนั้นนิยมรูปแบบการแช่แข็ง ซึ่งเป็นวิธีการถนอมอาหารที่ดีที่สุดของอาหารทะเลในปัจจุบัน

เนื่องจากผู้บริโภคมีความต้องการอาหารที่ยังสด ไม่มีการใส่สารเคมีในการถนอมอาหาร จึงเลือกกรรมวิธีแช่แข็งเป็นวิธีที่ถนอมอาหารทะเล อย่างไรก็ตาม การแช่แข็งยังมีผลทำให้คุณภาพของอาหารเสื่อมลง เช่น เซลล์เนื้อเยื่ออาหาร รสชาติ ความสด และสีของอาหาร การสูญเสียคุณภาพอาหารขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษาอาหาร อัตราในการแช่แข็ง และในการละลาย (1) เนื่องจากปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อการเกิดผลึกน้ำแข็ง ซึ่งมีผลต่อการทำลายเซลล์ของอาหาร ดังนั้นในหลาย ๆ ประเทศจึงได้มีการนำกระบวนการความดันสูงเข้ามาช่วยในกระบวนการแช่แข็งอาหารในประเภทต่าง ๆ เพื่อยืดอายุของอาหาร และทำให้คุณภาพของอาหารยังคงคุณภาพเดิมได้มากที่สุด

มูลเหตุจูงใจโครงการวิจัยนี้คือ มุ่งนำเทคโนโลยีการแช่แข็งมาใช้ประโยชน์ 2 ประการด้วยกัน ประการแรก มุ่งเพื่อจะช่วยพัฒนาคุณภาพของอาหารที่นำมาแช่แข็งโดยช่วยยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร ในประการที่สอง เพื่อพัฒนาการดำรงชีวิตอยู่ได้ โดยมุ่งพยายามจะรักษาเนื้อเยื่ออวัยวะ และเชื้อจุลินทรีย์ให้มีชีวิตอยู่ได้ (7)

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์ความดันสูงสำหรับกระบวนการถนอมอาหาร
2. เพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้อุปกรณ์ความดันสูงให้ใช้กับการแช่แข็งกุ้งสด

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาผลกระทบของความดันสูงต่อเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อ
2. ศึกษาการทำงานของเครื่องมือความดันสูง
3. ศึกษาและวิเคราะห์หาค่า drip loss ของกล้ามเนื้อและดูโครงสร้างเซลล์ภายในของกล้ามเนื้อผ่านการแช่แข็งด้วยความดันสูงแล้ว
4. เปรียบเทียบกระบวนการแช่แข็งด้วยความดันสูง และการแช่แข็งด้วยกระบวนการธรรมดา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสะสมความเข้าใจในหลักการของเครื่องความดันสูงและเกิดองค์ความรู้เรื่องเครื่องมือเพื่อนำมาใช้ในการถนอมอาหาร
2. สามารถหาเงื่อนไขของกระบวนการความดันสูงต่อกล้ามเนื้อ และหาวิธีที่ดีที่สุดในการแช่แข็งกล้ามเนื้อได้

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

2.1 ทฤษฎี

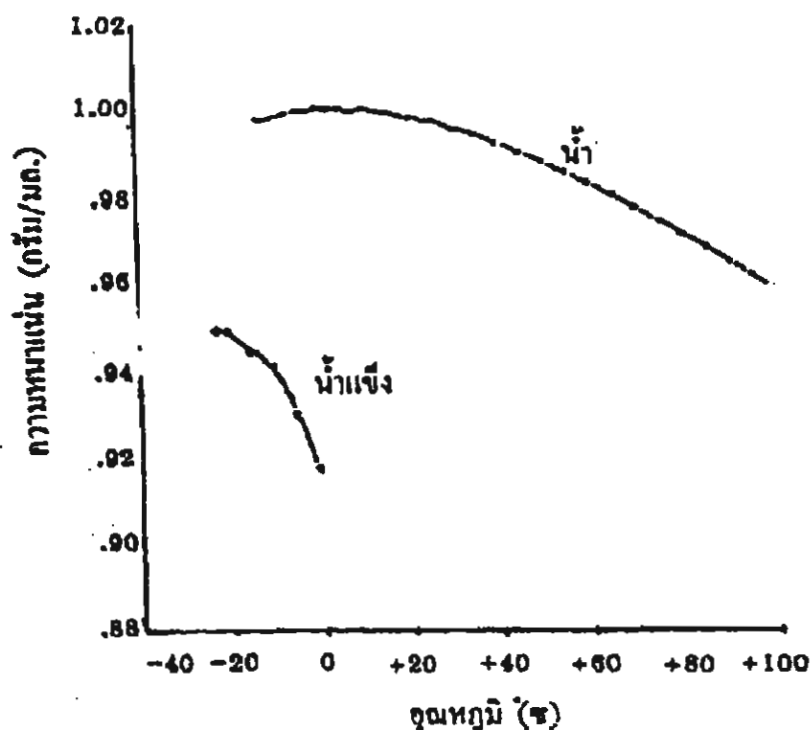
2.1.1 คุณสมบัติของอาหารแช่แข็ง (properties of freezing foods)

ลักษณะที่สำคัญอย่างหนึ่งของอาหารแช่แข็ง คือคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะบทบาทของน้ำในอาหารและการเปลี่ยนแปลงน้ำระหว่างกระบวนการแช่แข็ง มีดังต่อไปนี้

2.1.1.1 ความหนาแน่น (8)

ตามปกติน้ำจะมีความหนาแน่นค่อนข้างต่ำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จะมีความหนาแน่นประมาณ 0.998 กรัมต่อมิลลิเมตร เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงจนถึง 3.98 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของน้ำจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.9999 กรัมต่อมิลลิเมตร และจะลดลงอีกเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิน้ำลดลงถึง 0 องศาเซลเซียส และเมื่อน้ำเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็งที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของน้ำแข็ง ณ อุณหภูมินั้นจะลดลงไปอีกประมาณ 9% เนื่องจากเมื่อน้ำเปลี่ยนจากของเหลวไปเป็นของแข็งปริมาตรจะเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้เองที่มีผลกระทบต่อกระบวนการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิลดต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของน้ำแข็งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส จะมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.9481 กรัมต่อมิลลิเมตร

รูปที่ 2.1 แสดงค่าความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ -13 ถึง 100 องศาเซลเซียส และการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของน้ำแข็งในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง -22 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.1 แสดงค่าความหนาแน่นของน้ำและน้ำแข็งที่อุณหภูมิตั้งแต่ -40 ถึง 100 องศาเซลเซียส

2.1.1.2 จุดเยือกแข็งลดต่ำลง (freezing-point depression) (9)

จุดเยือกแข็งของน้ำที่มีอยู่ในอาหารจะลดต่ำลง เป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่ง ซึ่งอาหารจำนวนมากชนิด มักมีน้ำเป็นองค์ประกอบปริมาณสูง และมีตัวถูกละลายอยู่บ้าง ทำให้จุดเยือกแข็งจริงหรือเริ่มแรกของอาหารลดต่ำลงกว่าของน้ำบริสุทธิ์ ซึ่งปริมาณของจุดเยือกแข็งที่ลดต่ำลง จะขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุล และความเข้มข้นของตัวถูกละลายในอาหาร และในสารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ

2.1.1.3 เอนทัลปี (9)

ในการออกแบบระบบการแช่แข็ง จำเป็นต้องพิจารณาความต้องการของระบบทำความเย็น ในการลดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ให้ถึงระดับอุณหภูมิแช่แข็งที่ต้องการ กระบวนการแช่แข็งของอาหารค่อนข้างซับซ้อน เนื่องจากมีองค์ประกอบที่ส่งผลให้จุดเยือกแข็งลดต่ำลง การเปลี่ยนแปลงทั้งหมดเพื่อลดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ จะใช้ในการประมาณหาความต้องการระบบทำความเย็น

2.1.1.4 การนำความร้อน

คือค่าที่บ่งถึงอัตราเร็วของการส่งผ่านพลังงานความร้อนโดยการนำความร้อนของสารต่างๆ ค่าการนำความร้อนของน้ำจะมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับของเหลวชนิดอื่น และจะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิของน้ำลดลง แต่เมื่อเปลี่ยนสภาพเป็นน้ำแข็ง ค่านำความร้อนจะสูงขึ้นมาก เมื่อเปรียบเทียบค่านี้ของน้ำกับน้ำแข็งที่อุณหภูมิเดียวกัน น้ำแข็งจะมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าน้ำประมาณ 4 เท่า ดังนั้นน้ำแข็งจึงนำความร้อนได้สูงกว่าน้ำมาก คุณสมบัติของการนำความร้อนนี้เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่ออัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งและการคืนตัวกลับเป็นน้ำ โดยเฉพาะในระยะเริ่มต้นที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ แต่ปัจจัยนี้เพียงอย่างเดียวจะเป็นตัวชี้ถึงอัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิยังไม่ถูกต้องนักเพราะค่านี้เป็นเพียงอัตราของการนำความร้อนของสารที่อุณหภูมิตั้งแต่ระดับหนึ่งเท่านั้น ค่าของความร้อนจำเพาะกล่าวแล้วจะเข้ามามีบทบาทร่วมด้วยเพราะการนำความร้อนจะต้องคำนึงถึงทั้งปริมาตรและมวลของสารนั้นด้วย

2.1.1.5 การแพร่กระจายความร้อน

คือค่าที่ใช้หาอัตราเร็วของการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณได้จากค่าการนำความร้อนของสารนั้นหารด้วยค่าความร้อนจำเพาะและค่าความหนาแน่นของสารนั้น ในทางกายภาพ ค่านี้จะบอกถึงความสามารถในการนำความร้อนและการกักเก็บความร้อนไว้ในสารนั้น สารใดที่มีค่าการแพร่กระจายความร้อนสูงจะมีการเปลี่ยนระดับอุณหภูมิได้รวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบค่าการกระจายความร้อนของน้ำกับน้ำแข็งที่อุณหภูมิเดียวกันคือที่ 0 องศาเซลเซียส น้ำจะมีค่า 0.0013 ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ส่วนน้ำแข็งจะมีค่า 0.011 ตารางเซนติเมตรต่อวินาที จะเห็นได้ว่าน้ำแข็งมีค่าการกระจายความร้อนได้สูงกว่าน้ำถึงประมาณ 9 เท่า จากสมบัติที่แตกต่างกันของน้ำและน้ำแข็งที่กล่าวมานี้เองที่มีผลกระทบต่ออัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งและอัตราเร็วของการคืนตัวเข้าสู่สภาพเดิมของอาหารแช่เยือกแข็ง

2.1.2 กระบวนการแช่แข็ง (9)

กระบวนการถนอมอาหารด้วยวิธีแช่แข็งเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถรักษากลิ่น รส สี และคุณภาพอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อปฏิบัติอย่างถูกต้อง กลไกวิธีการเก็บรักษาโดยการแช่แข็งเกิดขึ้นได้หลายอย่าง เมื่อผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส ทำให้อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และการเสื่อมเสีย เนื่องจากจุลินทรีย์ลดลงอย่างมาก รวมทั้งปฏิกิริยาอื่นๆ เนื่องจากเอนไซม์ และปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากนี้การเกิดผลึกน้ำแข็งภายในผลิตภัณฑ์ จำทำให้น้ำที่เหลือทำปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดการเสื่อมเสียลดลงนั่นเอง

อย่างไรก็ตาม แม้คุณภาพอาหารที่ได้จากการแช่แข็งจะสูง แต่ขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้ในการแช่แข็งและสภาวะการเก็บขณะแช่แข็งด้วย อัตราการแช่แข็งหรือเวลาที่ใช้ลดอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดเยือกแข็งเริ่มต้นไปยังอุณหภูมิที่ต่ำกว่า จะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ แต่ในลักษณะต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดอาหาร เช่น ในบางผลิตภัณฑ์ต้องการแช่แข็งอย่างรวดเร็ว (rapid freezing หรือ เวลาแช่แข็งสั้น) เพื่อให้ผลึกน้ำแข็งที่ได้เล็กมากภายในโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ และก่อให้เกิดความเสียหายต่อเนื้อเยื่อน้อยที่สุด แต่บางผลิตภัณฑ์อาจไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง และในบางผลิตภัณฑ์อาจมีรูปสัณฐานและขนาดที่ไม่เหมาะกับการแช่แข็งอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ สภาวะอุณหภูมิก็มีผลต่อคุณภาพของอาหารแช่แข็งมาก ถ้าอุณหภูมิที่เก็บเพิ่มขึ้นหรืออุณหภูมิลดลงๆ จะยิ่งทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์แย่มากขึ้น

ดังนั้นจึงได้มีระบบแช่แข็งมากมายที่ออกแบบเพื่อให้เหมาะสมกับอาหาร และทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้สูงที่สุด

2.1.2.1 แผนภาพเฟสของน้ำบริสุทธิ์

ความสัมพันธ์ของสถานะของน้ำทั้ง 3 รูป คือ ของแข็ง ของเหลวและไอน้ำ มีความเกี่ยวข้องกับงานแปรรูปอาหารในหลายๆด้านด้วยกันได้แก่ การทำให้เข้มข้นขึ้น การทำแห้งด้วยการแช่เยือกแข็ง (freeze-drying) และการทำให้เย็นด้วยระบบสุญญากาศ (vacuum cooling) ซึ่งความสัมพันธ์ทั้ง 3 สถานะดังกล่าวสามารถอธิบายให้เข้าใจได้ง่ายโดยอาศัยแผนภาพเฟส ซึ่งหมายถึงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิที่มีอิทธิพลต่อทั้ง 3 สถานะของน้ำและสารอื่นเช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ในโตรเจน เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ตามแนวเส้น AO แสดงถึงสถานะของของเหลวและไอ จะเห็นได้ว่าที่ความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะมีจุดตัดอยู่บนเส้น AO แสดงว่าที่จุดนี้อาจจะมีสภาพของเหลวก็ได้ เป็นไอก็ได้ที่ความดันระดับเดิมแต่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นน้ำจะมีสถานะเป็นไอน้ำนั้น ขณะเดียวกันที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แต่ความดันเพิ่มขึ้น น้ำยังคงสภาพเป็นของเหลวอยู่ได้ บางครั้งเรียกแนวเส้น AO นี้ว่า ความดันไอ(vapour-pressure) หรือ boiling point curve

จุด A เรียกว่าอุณหภูมิวิกฤต(critical temperature) ของน้ำคือ ที่ระดับอุณหภูมินี้ไม่สามารถจะให้น้ำเป็นของเหลวได้อีกในระดับความดันนั้น

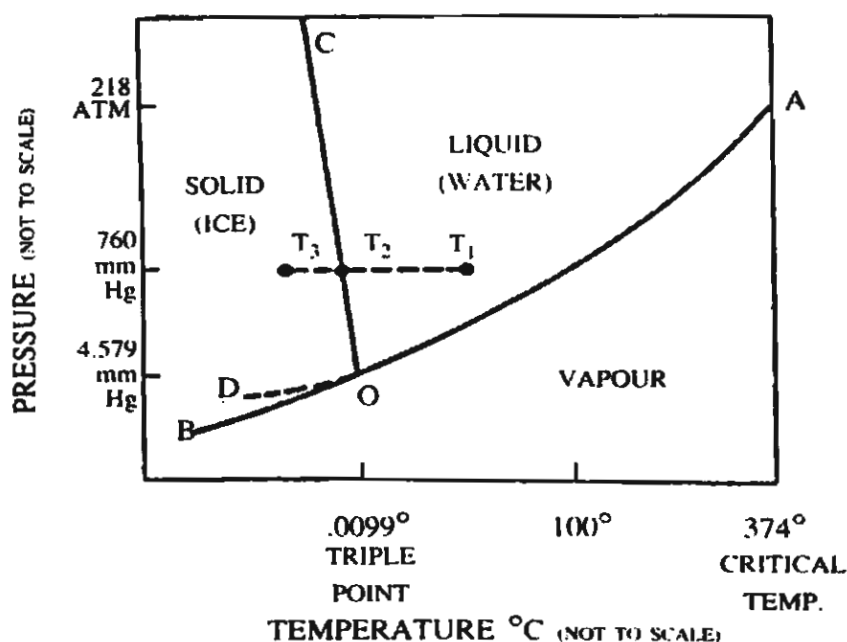
แนว BO แสดงถึงสถานะของน้ำที่เป็นของแข็งกับเป็นไอ (vapour & solid curve) แสดงว่าน้ำแข็งจะกลายเป็นไอก็ได้เลยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นหรือลดความดันลง บางครั้งจึงเรียกว่า sublimation curve จากความจริงตามปรากฏการณ์เช่นนี้จึงนำมาใช้กับกรรมวิธีของการทำแห้งด้วยการแช่เยือก

แข็งอาหารต่างๆ ซึ่งในกรรมวิธีดังกล่าวถ้าจะให้การระเหิดเป็นไปได้เร็ว ควรจะทำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส และความดันต่ำกว่า 4.579 มิลลิเมตรปรอท

แนว CO แสดงถึง สภาวะของแข็งกับของเหลว ซึ่งบางครั้งจะเรียกว่า melting point curve เป็นที่น่าสังเกตว่าแนว CO จะเอนเข้าหาแกนตั้งซึ่งเป็นแกนของความดัน แสดงว่าเมื่อเพิ่มความดันสูงขึ้นจะมีผลให้จุดหลอมตัวของน้ำแข็งลดลงได้ และจากผลนี้ช่วยให้เข้าใจได้ถึงเหตุที่น้ำแข็งมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ

เส้น DO แสดงถึง ความดันไอของ supercooled water ซึ่งแสดงว่า supercooled water จะมีความดันไอบากกว่าน้ำแข็งที่อุณหภูมิเดียว

ทุกเส้นในแผนภาพเฟสจะตัดกันที่จุด O ซึ่งเป็นจุดตัดกันตรงอุณหภูมิ 0.0099 องศาเซลเซียส และที่ความดัน 4.56 มิลลิเมตรปรอท ซึ่งเรียกจุดนี้ว่า จุดร่วมสาม (triple point) ซึ่งเป็นจุดสมดุลของทั้งสามสถานะคือ ที่จุดนี้น้ำอาจจะอยู่ในสภาพของแข็ง ของเหลวและเป็นไอก็ได้ ที่จุดนี้จะมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็งธรรมดาเล็กน้อย การเกิดสมดุลได้เนื่องจากสาเหตุ 2 ประการคือ ที่ความดันต่ำๆเช่นนี้โครงสร้างของน้ำแข็งจะคงรูปดีกว่า สามารถรักษาสถานะของน้ำแข็งไว้ได้ดี ส่วนก๊าซที่ละลายอยู่จะสลายตัวออกไป



รูปที่ 2.2 แผนภาพเฟสที่แสดงสถานะต่าง ๆ ของน้ำ

2.1.2.2 การเกิดผลึกน้ำแข็งในอาหาร (6,8,9)

ในขณะที่ทำการลดอุณหภูมิของอาหารลงต่ำจนถึงระดับที่น้ำหรือสารละลายในอาหารนั้นเปลี่ยนเป็นผลึกน้ำแข็งพบว่า

1. รูปร่างลักษณะของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในเซลล์เนื้อเยื่ออาหารนั้นจะมีลักษณะต่างกัน
2. ขนาดของผลึกน้ำแข็งที่ต่างกัน จะมีผลต่อคุณภาพอาหารแช่แข็งเป็นอย่างมาก ผลึกน้ำแข็งจะมีขนาดเล็กหรือใหญ่ขึ้นอยู่กับอัตราแช่แข็งเป็นสำคัญ

กระบวนการเกิดผลึกน้ำแข็งมี 2 ขั้นตอนคือ

2.1.2.2.1 การก่อนิวเคลียสผลึก (crystal formation)

คือปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของน้ำมารวมตัวกันอย่างมีระเบียบจนเป็นอนุภาคเล็กๆ ขึ้นขั้นตอนหรือกลไกในการก่อนิวเคลียสผลึกยังไม่มีคำอธิบายที่กระจ่าง แต่คาดว่าในช่วงแรกของการก่อนิวเคลียสผลึกนั้นจะเกิดขึ้นเป็นครั้งคราวแล้วก็สลายตัวไปซึ่งขนาดของอนุภาคในช่วงนี้เรียกว่าขนาดวิกฤต (critical size) จนเมื่อสภาวะเหมาะสมคือ ระดับอุณหภูมิของน้ำหรือสารละลายนั้นลดต่ำลงจนถึงจุดความเย็นยิ่งยวดยิ่ง (supercooling) ซึ่งจะอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง การก่อนิวเคลียสผลึกจะเกิดได้ 2 แบบคือ homogeneous nucleation จะเกิดในน้ำบริสุทธิ์เท่านั้น ไม่เกี่ยวข้องกับการแช่เยือกแข็งอาหาร อีกแบบหนึ่งคือ heterogeneous nucleation จะเกิดขึ้นในการแช่เยือกแข็งเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิตทั่วไป จะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของน้ำเรียงตัวกันเป็นอนุภาคเล็กๆ และเกิดสภาวะเหมาะสมขึ้นที่ผิวหน้าอนุภาคนั้น โดยมีสารอื่นที่ปะปนอยู่มาจับบนผิวหน้าหรือเกิดขึ้นบนผิวหน้าภาชนะบรรจุ หรืออาจเกิดจากอนุภาคของสารที่ผสมอยู่ด้วยก็ได้

2.1.2.2.2 การเพิ่มขนาดผลึก (crystal growth)

เป็นปรากฏการณ์ต่อเนื่องจากการก่อนิวเคลียสผลึก การเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็งจะเกิดได้ที่อุณหภูมิใกล้ๆ กับจุดหลอมเหลว โดยโมเลกุลของน้ำจะเคลื่อนตัวเข้ามาเกาะอยู่กับนิวเคลียสผลึกที่ก่อตัวแล้วมากกว่าที่จะก่อนิวเคลียสผลึกขึ้นใหม่เพราะ โมเลกุลของน้ำในสภาวะที่เป็นของเหลวมีขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ได้ในอัตราเร็วสูงและจะหยุดลงเมื่อกระทบกับผิวหน้าของนิวเคลียสผลึก จากปรากฏการณ์ดังกล่าว จึงทำให้อัตราการเพิ่มขนาดผลึกสูงกว่าเมื่อเทียบกับอัตราการก่อนิวเคลียสผลึกในช่วงของ supercooling ดังแสดงในรูปที่ 2.3

ขนาดของผลึกน้ำแข็งในอาหารแช่เยือกแข็งมีความสำคัญที่เกี่ยวพันไปถึงคุณภาพของอาหารแช่แข็งเป็นอย่างมาก แม้จะเป็นที่ยอมรับกันว่าการแช่แข็งนั้นจะป้องกันการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพได้หลายอย่างอย่างน่าทึ่งก็ตาม แต่การที่น้ำในอาหารกลายเป็นผลึกน้ำแข็งก็นับว่าก่อให้เกิดปัญหาที่ไม่ต้องการอีกมาก ดังนั้นหากผู้ใดสามารถทำให้น้ำในอาหารไม่กลายเป็นน้ำแข็ง

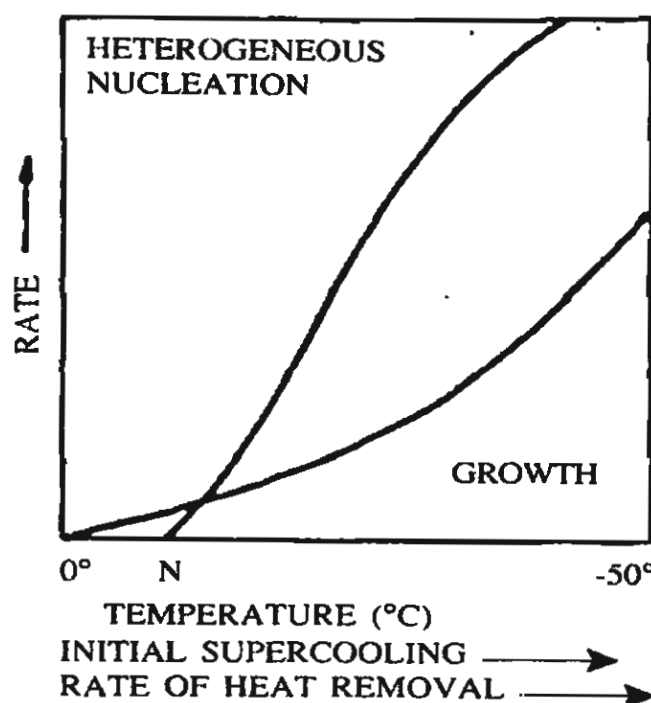
แม้อุณหภูมิจะถึงจุดเยือกแข็งของอาหารนั้นได้จะเป็นกรรมวิธีที่ดียิ่ง แต่ปัจจุบันทำได้แต่เพียงควบคุมให้ผลึกน้ำแข็งที่เกิดมานั้นมีขนาดเล็กที่สุดเท่านั้น

การจะควบคุมขนาดของผลึกน้ำแข็งในสิ่งที่แช่แข็งนั้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการก่อนิวเคลียสผลึกและอัตราการเพิ่มขนาดของผลึก ซึ่งสามารถเข้าใจได้ง่าย โดยดูจากรูปที่ 2.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในตัวอย่างอาหารแช่แข็งที่ไม่มีการต่อผลึก(seeding) เมื่อลดอุณหภูมิลงระดับหนึ่งจนใกล้จุดเยือกแข็ง อุณหภูมิในการแช่เยือกแข็งจะยังคงที่อยู่ในช่วงของจุดหลอมเหลวและเมื่อลดลงถึงจุด N จะเป็นผลให้เกิดนิวเคลียสผลึกได้จำนวนน้อยเช่น อาจจะมีเพียง 2-3 อนุภาค แต่ที่ช่วงนี้จะมีการขยายขนาดอยู่ในอัตราสูงดังนั้นจึงทำให้อนุภาคขยายขนาดได้อย่างรวดเร็ว เป็นผลให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ ประกอบกับเกิดความร้อนจากการเกิดผลึกปล่อยออกมาด้วย จึงยิ่งทำให้อุณหภูมิกงที่อยู่ใกล้ๆกับจุดสมดุลงของแข็ง – ของเหลวจนนิวเคลียสผลึกจะไม่มีโอกาสเกิดขึ้นเลย แสดงว่าการแช่เยือกแข็งนี้เป็นไปอย่างเชื่องช้าที่เรียกว่า การแช่แข็งแบบช้า (slow freezing) แต่ถ้าในระบบการแช่เยือกแข็งนั้นสามารถกระจายความร้อนออกจากระบบได้อย่างรวดเร็วจนทำให้อุณหภูมิต่ำกว่าจุด N ได้อย่างรวดเร็วแล้วจะเป็นผลให้นิวเคลียสผลึกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและมีจำนวนมาก แต่อย่างไรการเพิ่มขนาดก็จะเกิดขึ้นบ้างในอัตราจำกัด ดังนั้นจะเห็นได้ว่าขนาดของผลึกที่สมบูรณ์ในการแช่เยือกแข็งขึ้นกับจำนวนนิวเคลียสผลึกที่เกิดขึ้น

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดเล็กในอาหารขึ้นอยู่กับ

1. ความเย็นยวดยิ่ง
2. การดึงความร้อนออกอย่างรวดเร็ว
3. การคนขณะมีการตกผลึก
4. มีตัวทำลายพวกสารอินทรีย์บางชนิด เช่น เอทานอล ซูโครส และ โปรตีนบางชนิด

การควบคุมขนาดของผลึกน้ำแข็งทำได้ไม่ยากนัก ถ้าระบบนั้นสามารถทำการคนได้เช่น ในการผลิตไอศกรีม เพราะการคนระหว่างแช่แข็งจะช่วยเพิ่มอัตราการดึงความร้อนได้ด้วย แต่การคนจะต้องกระทำอย่างเหมาะสมหากคนด้วยอัตราเร็วสูงเกินไปอาจทำให้การตกผลึกช้าลงก็เป็นได้



รูปที่ 2.3 อัตราการเพิ่มขนาดผลึกและการก่อนิวเคลียสผลึก

2.1.2.2.3 การขึ้นรูปผลึก (Recrystallization)

การควบคุมขนาดและรูปร่างของผลึกน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์ที่นำมาแช่แข็งดูจะเป็นเรื่องง่าย ๆ ถ้าผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นนั้นคงรูปอยู่ได้ แต่บังเอิญปรากฏการณ์ตามธรรมชาติในเรื่องนี้มีได้เป็นเช่นนั้น เพราะผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจะอยู่ในสภาพไม่คงที่ โดยทั่วไปแล้วเพราะผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขนาดขึ้นได้ในช่วงการเก็บรักษา ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า recrystallization ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลงใดๆที่เกี่ยวกับจำนวน ขนาด รูปร่างและการเรียงตัวของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในช่วงต่อจากที่ถึงนั้นได้แข็งตัวโดยสมบูรณ์แล้ว ปรากฏการณ์นี้ได้พบเมื่อมีผู้ทำการศึกษาผลไม้ 3 ชนิดคือ สตรอเบอรี่ ราสเบอรี่ และพีช มาแช่เยือกแข็งในน้ำเชื่อมเข้มข้น 50% ทำการแช่เยือกแข็งที่อัตราเร็วต่างกันคือ แช่เยือกแข็งแบบช้าโดยใช้อากาศนิ่งที่ 0 องศาเซลเซียส เทียบกับการแช่เยือกแข็งแบบเร็วโดยใช้ air blast ที่ -40 องศาเซลเซียส และแช่เยือกแข็งแบบเร็วมาก (ultra rapid rate) โดยจุ่มลงในไนโตรเจนเหลวซึ่งพบว่าจากการแช่เยือกแข็งในแต่ละแบบนี้ ขนาดของผลึกจะต่างกันไป เมื่อเก็บตัวอย่างไว้ที่ 0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 เดือน เอามาศึกษาขนาดของผลึกน้ำแข็งอีกครั้ง พบว่าขนาดของผลึกได้เปลี่ยนแปลงไปคดขยมีขนาดเท่าเทียมกันในทุกตัวอย่าง ซึ่งแสดงให้เห็นชัดเจนว่ามี recrystallization เกิดขึ้นอย่างแน่นอน และได้มีผู้

ทำการศึกษาต่อไปอีกว่าการ recrystallization นี้เกิดขึ้นได้อย่างไรและมีกี่แบบ ซึ่งจากผลการศึกษานี้ได้พบว่า recrystallization เกิดขึ้นได้ 5 ทางคือ

1. Isomass Recrystallization
2. Migratory Recrystallization
3. Accretive Recrystallization
4. Pressure-Induced Recrystallization
5. Irruptive Recrystallization

วิธีที่พบมากที่สุดในอาหารแช่แข็งได้แก่ Migratory Recrystallization ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิในการเก็บรักษาไม่คงที่ ซึ่งป้องกันได้โดยเก็บรักษาอาหารแช่แข็งนั้นไว้ที่อุณหภูมิต่ำๆและคงที่ตลอดเวลา

2.1.2.2.4 ความเย็นยวดยิ่ง

คือจุดที่เมื่ออุณหภูมิของน้ำลดลงต่ำลงไปกว่าจุดเยือกแข็ง แต่ยังไม่เกิดผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้น จุดนี้เป็นสิ่งบอกให้ทราบว่าเกิดนิวเคลียสผลึกขึ้นในช่วงของการแช่แข็งหรือไม่ ได้มีผู้ทำการศึกษาช่วงความเย็นยวดยิ่งของตัวอย่างหลายชนิด พบว่าความเย็นยวดยิ่งปรากฏที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของตัวอย่างนั้นๆ แต่อุณหภูมิมักจะกลับขึ้นไปอยู่ที่สูงกว่า 0 องศาเซลเซียส อย่างรวดเร็ว

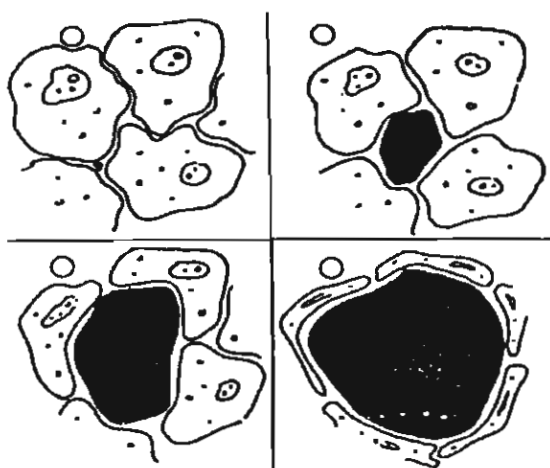
2.1.2.3 บริเวณที่เกิดผลึกน้ำแข็งภายในเซลล์

ผลึกน้ำแข็งจะเกิดขึ้นที่ส่วนใดของเซลล์เนื้อเยื่อก็ตามขึ้นอยู่กับปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อไปนี้คือ

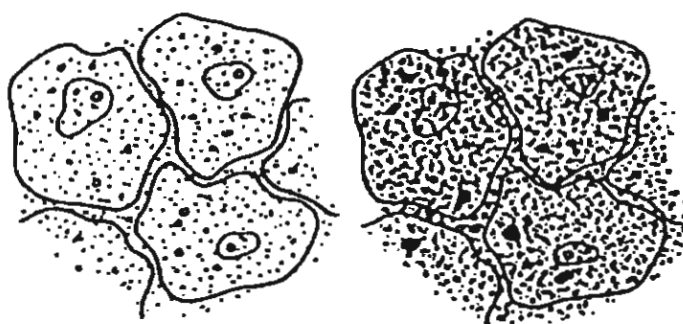
1. อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็ง
2. อุณหภูมิตัวอย่าง
3. ลักษณะตามธรรมชาติของเซลล์

โดยทั่วไปการแช่เยือกแข็งแบบช้าจะเกิดผลึกขนาดใหญ่และจะเกิดที่บริเวณภายนอกเซลล์ (extracellular) น้ำภายในเซลล์จะถูกดึงมาช่วยเพิ่มขนาดของผลึกที่ภายนอกเซลล์เป็นผลให้เซลล์หดตัวลดขนาดลงซึ่งจะเกิดเหมือนกันทั้งในเซลล์เนื้อเยื่อจากพืชและสัตว์รวมทั้งพวกสารแขวนลอยในเซลล์ (cellular suspension) ด้วย ซึ่งได้แก่เซลล์จุลินทรีย์ ตัวอสุจิ และเม็ดเลือดแดง ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.4 แต่ถ้าทำการแช่เยือกแข็งในอัตราเร็วสูงขึ้นและในอุณหภูมิต่ำ ผลึกจะเกิดขึ้นได้ทั้งในส่วนภายในเซลล์ (intracellular) และภายนอกเซลล์ได้พร้อมๆกัน มีขนาดของผลึกสม่ำเสมอกระจายทั่วไปจึงไม่ทำให้เซลล์เกิดการหดตัว ซึ่งเป็นเหตุผลอีกอันหนึ่งที่พอจะอธิบายได้ถึงเรื่องคุณภาพ

ผลิตภัณฑ์ที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ความจริงผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นในทั้งสอง ส่วนของเซลล์แต่จะมีภายนอกเซลล์น้อยกว่าเพราะส่วนนี้มีเนื้อที่น้อยกว่าส่วนภายในเซลล์



การแช่เยือกแข็งแบบช้า



การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว

รูปที่ 2.4 การเกิดผลึกน้ำแข็งโดยการแช่เยือกแข็งในเซลล์เนื้อเยื่อ

2.1.2.4 ความทนทานของเซลล์เนื้อเยื่อต่อการแช่เยือกแข็ง

ความทนทานของเซลล์พืชที่มีต่อการแช่เยือกแข็งจะอยู่ในระดับปานกลาง เนื่องจากมีเซลล์ลูโลสเป็นองค์ประกอบอยู่ โดยทั่วไปแล้วเซลล์เนื้อเยื่ออาหารทั้งพืชและสัตว์มีความทนต่อการแช่เยือกแข็งได้มากน้อยต่างกัน ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของเซลล์และการปฏิบัติก่อนจะนำมาแช่เยือกแข็ง แต่เมื่อเปรียบเทียบแล้วเซลล์สัตว์มีความทนทานในการแช่เยือกแข็งดีกว่าเซลล์พืช เพราะโครงสร้างของเซลล์แตกต่างกัน แม้เนื้อสัตว์ด้วยกันก็ยังมี ความทนต่างกันเช่น เมื่อเปรียบเทียบเนื้อวัวกับเนื้อหมู

พบว่า เนื้อหมูจะทนทานต่อการแช่เยือกแข็งได้ดีกว่า สำหรับเนื้อปลาและเนื้อไก่ พบว่าเนื้อไก่จะทนทานต่อการแช่เยือกแข็งได้ดีกว่า ส่วนผลไม้และผัก พบว่าเซลล์ผักจะทนได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามอาหารทุกอย่างสามารถนำมาแช่เยือกแข็งได้ยกเว้นบางชนิดที่ไม่นิยม เพราะไม่ทนทานต่อการแช่เยือกแข็งเลยเช่น กุ้ง มะเขือเทศ ผักกาดหอมและผักสลัดชนิดต่างๆ

2.1.2.5 อัตราการแช่แข็ง

มีคำนิยามต่าง ที่ใช้อธิบายอัตราการแช่แข็ง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความพร้อมและความแม่นยำของเครื่องมือที่ใช้ทำให้ความหมายของอัตราการแช่แข็งจึงแตกต่างกัน เช่นอัตราการแช่แข็งหมายถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อ หน่วยเวลา หรือหมายถึงอัตราการคายความร้อนนอกจากนี้ยังมีความหมายอื่น ๆ อีก เช่น ลักษณะของแนวน้ำแข็ง ตำแหน่งของผลึกน้ำแข็ง และปริมาณน้ำแข็งที่เกิดขึ้นต่อหน่วยเวลา เป็นต้น [8]

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการแช่แข็ง ได้แก่ [9]

1. ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผลิตภัณฑ์ และตัวกลางทำให้เย็น (cooling medium)
2. ลักษณะการถ่ายเทความร้อนจากผลิตภัณฑ์ หรือภายในผลิตภัณฑ์
3. ขนาด ชนิด และรูปร่างของภาชนะบรรจุผลิตภัณฑ์
4. ขนาด รูปร่าง และคุณสมบัติทางด้านการคายความร้อนของผลิตภัณฑ์

2.1.2.6 เวลาในการแช่แข็ง

เวลาในการแช่แข็งหรืออัตราแช่แข็งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเลือกระบบแช่แข็ง เพื่อให้ได้คุณภาพที่เหมาะสม เวลาของการแช่แข็งจะเป็นตัวบ่งบอกความจุของระบบด้วย และยังมีผลโดยตรงต่อคุณภาพอาหารแช่แข็งด้วย [9]

ดังได้กล่าวแล้วว่าอัตราของการแช่แข็งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของผลึกน้ำแข็งและบริเวณการเกิด ซึ่งจะมีผลกระทบต่อคุณภาพของอาหารที่นำมาแช่แข็ง จึงควรทำความเข้าใจถึงอัตราเร็วของการแช่แข็ง [23]

การแช่แข็งซึ่งนิยมใช้อยู่ในระดับอุตสาหกรรมทั่วไป [23] แบ่งได้เป็น 3 ระดับ ได้แก่

1. การแช่แข็งแบบช้า (slow freezing rate)
2. การแช่แข็งแบบเร็ว (rapid freezing rate)
3. การแช่แข็งแบบเร็วมาก (ultra rapid freezing rate)

2.1.2.7 การละลาย [6,8]

การละลายเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อนในกรรมวิธีการแช่แข็งแล้วยังพบว่า [18]

1. การละลายของอาหารที่ไม่ใช่ของเหลวจะเกิดช้ากว่าการเยือกแข็ง
2. ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างการละลาย จะมีค่าน้อยกว่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างการแช่แข็ง
3. รูปแบบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการละลายไม่เป็นที่ต้องการมากกว่ารูปแบบที่เกิดขึ้นระหว่างการแช่แข็ง

การละลายอาหารแช่แข็ง (thawing) เป็นการทำให้อาหารแช่แข็งละลายก่อนนำมารับประทาน หรือนำมาประกอบอาหาร การละลายอาหารแช่แข็งนั้นมีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าการแช่แข็งและการเก็บรักษา ทั้งนี้เพราะวิธีการละลายอาหารแช่แข็งจะมีผลต่อคุณภาพอาหาร วิธีที่เหมาะสมกับการละลายอาหารแช่แข็งก็คือ วิธีที่เร็วที่สุด (fast thawing) แต่อุณหภูมิไม่สูงเกินไป จนเชื้อจุลินทรีย์ที่ผิวหน้าหรือในอาหารสามารถเจริญได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งปัญหาในข้อหลังจะหมดไป ถ้านำอาหารไปปรุงผ่านความร้อนที่สามารถทำลายจุลินทรีย์ได้หมด แต่ถ้าจะละลายเพื่อนำไปแปรรูปต่อ หรือรับประทานสด หรือเหลือบริโภคแล้วนำไปเก็บต่อจะต้องระวัง ทั้งนี้เพราะการที่อาหารแช่แข็งมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งเล็กน้อย (subfreezing temperature) ซึ่งเป็นช่วงเวลาส่วนใหญ่ของการละลายจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่มีผลเสียคือ

1. การเกิดผลึกน้ำแข็งใหม่ที่ใหญ่ขึ้น (recrystallization) ซึ่งสามารถทำลายเนื้อเยื่อ โครงสร้าง และเนื้อเยื่อสัมผัสของอาหาร
2. การเกิดปฏิกิริยาเคมีในอัตราที่สูงอย่างรวดเร็วซึ่งมีผลเสียต่อ สี กลิ่น รส และคุณค่าทางอาหาร
3. มีผลก่อให้เกิดการปรับตัวและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บางชนิด โดยเฉพาะหากใช้เวลาในการละลายนาน

โดยทั่วไปแล้วผลการศึกษาจะชี้ให้เห็นว่าการละลายที่รวดเร็วนั้นจะได้อาหารคินคั้วที่มีคุณภาพดีกว่าการใช้เวลานาน (slow thawing) การละลายที่ใช้เวลานาน ก่อให้เกิดการสูญเสียจากอาหารเป็นจำนวนมาก เนื่องจากเกิดผลึกน้ำแข็งใหม่ทำลายผนังเนื้อเยื่อของเซลล์ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เนื้อเยื่อไม่สามารถดูดซึมน้ำกลับได้ นั่นคือน้ำที่ไหลซึมออกมา (drip loss) จากอาหารแช่แข็งซึ่งมักจะเป็นผลเสียต่อ สี รส คุณค่าทางอาหารและเนื้อสัมผัสของอาหาร

2.1.2.8 ระบบแช่แข็ง [9]

เมื่อต้องการแช่ผลิตภัณฑ์อาหาร จำเป็นต้องให้ผลิตภัณฑ์สัมผัสกับตัวกลางที่มีอุณหภูมิต่ำช่วงหนึ่ง เพื่อกำจัดความร้อนสัมผัส และความร้อนแฝงของการหลอมเหลวออกจากผลิตภัณฑ์ อันมีผลให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ลดลง และน้ำภายในเปลี่ยนแปลงจากสถานะของเหลวไปเป็นของแข็ง (น้ำแข็ง) ดังนั้นตัวกลางที่ให้คามเย็นนี้จะต้องมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอย่างมาก เพื่อให้กระบวนการแช่แข็งใช้เวลาสั้นที่สุด รวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบพาต้องมามีค่าสูงด้วย

กระบวนการแช่แข็งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบคือ การสัมผัสโดยตรง (direct-contact system) และการสัมผัสโดยอ้อม (indirect-contact system) การใช้ระบบใดนั้น ต้องขึ้นกับลักษณะของผลิตภัณฑ์ก่อน และหลังการแช่แข็ง

2.1.3 เทคโนโลยีความดันสูง (High Pressure Technology)

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการถนอมอาหารโดยใช้ความดันสูงมีมาตั้งแต่ปลายศตวรรษที่ 19 เริ่มจาก Royer อธิบายการฆ่าเชื้อแบคทีเรียโดยใช้ความดันสูง และ Hite และคณะได้รายงานผลของความดันสูงในการถนอมนม รวมถึงผลไม้และผัก จากนั้นจึงได้มีการศึกษาการถนอมอาหารด้วยความดันสูงในประเทศต่างๆอย่างต่อเนื่อง

2.1.3.1 สาเหตุที่นำกระบวนการความดันสูงเข้ามามีใช้ในการถนอมอาหาร

เมื่อนำน้ำมาแช่แข็งที่ความดันบรรยากาศ จะทำให้เกิดการขยายปริมาตรเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เนื้อเยื่อของอาหารถูกทำลาย แต่จากการศึกษาเมื่อนำความดันสูงเข้ามามีในกระบวนการแช่แข็งของน้ำ จะไม่ก่อให้เกิดการขยายตัวในระหว่างการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็ง [15]

เนื่องจากอัตราการแช่แข็งมีผลต่อกระบวนการแช่แข็ง กล่าวคือ

1. กระบวนการแช่แข็งช้าจะก่อให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ และมีผลต่อการทำลายโครงสร้างและคุณสมบัติของอาหาร [15]
2. การแช่แข็งด้วยอัตราเร็วมาก (ultra rapid freezing rate) เช่นการแช่แข็งแบบไครโอจีนิก ถึงแม้จะช่วยลดการทำลายของเนื้อเยื่อ แต่ก็ยังเป็นสาเหตุทำให้เกิดการแตก (cracking) โดยอาจเกิดจากการที่ปริมาตรในอาหารเกิดการขยายตัวจึงทำให้เกิดช่องว่างในโครงสร้างซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการทำลายเนื้อเยื่อ หรือเกิดจากการแข็งตัวภายในของผลิตภัณฑ์ แต่ข้างในเนื้อตัวอย่างไม่แข็งเมื่อผ่านการเปลี่ยนสถานะ ดังนั้นเมื่อเกิดความเค้นขึ้นภายในเซลล์มากกว่าความต้านทานของตัวอย่างที่แข็ง จึงเป็นสาเหตุให้เกิดการแตก [16]

ดังนั้นจึงได้มีการนำกระบวนการความดันเข้ามาช่วยซึ่งจะหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่แข็งแกร่งและเป็นแบบไฮโมจิเนียสโดยตลอดผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดความเค้น

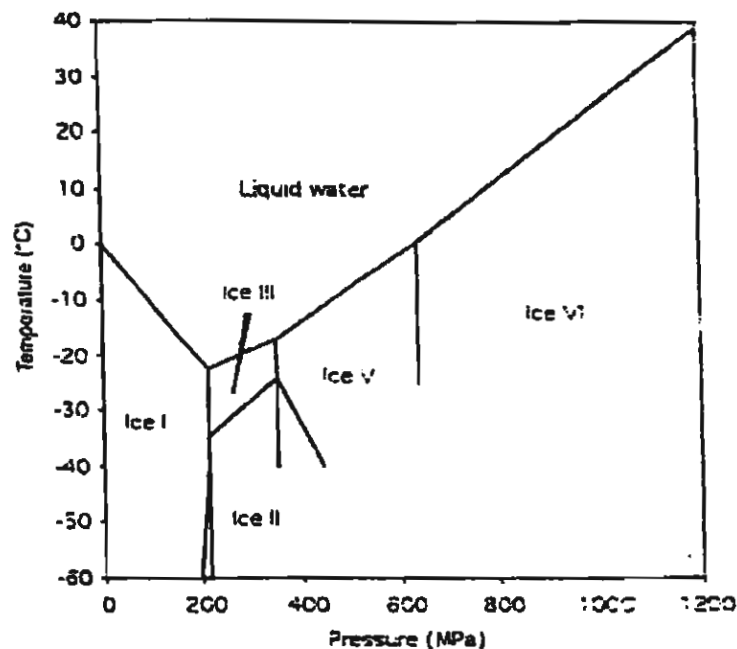
ปัจจุบันเทคนิคการใช้ความดันสูง ได้รับความนิยมมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง มีการวิจัยและพัฒนาการใช้ความดันสูงเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมากในช่วงเวลาที่ผ่านมา โดยเริ่มใช้กับผลิตภัณฑ์ประเภทขนม น้ำผลไม้ และปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้กับเนื้อหมู เนื้อวัว อาหารทะเล ผักและผลไม้ และอาหารแปรรูปในภาชนะบรรจุ [17]

2.1.3.2 หลักการของความดันสูง

เมื่อนำอาหารเข้าไปในเครื่องถนอมอาหารด้วยความดันสูง และเมื่อนำอาหารออกมาพบว่าคุณสมบัติของอาหารไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจาก เครื่องถนอมอาหารด้วยความดันสูงนี้จะให้ความดันทุกทิศทางกับตัวอาหาร และยังทำให้อาหารเนื้อแน่นขึ้น [17]

หลักการพื้นฐานของการใช้ความดันสูงกับอาหาร คือการบีบอัดน้ำที่อยู่ล้อมรอบอาหาร การลดปริมาตรของน้ำที่ความดันสูงขึ้นถึงว่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับก๊าซ น้ำจะมีปริมาตรลดลงประมาณ 4% ที่ 100 เมกะปาสกาล 7% ที่ 200 เมกะปาสกาล 11.5% ที่ 400 เมกะปาสกาล (โดยมีอุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส) และน้ำจะเปลี่ยนแปลงเป็นของแข็งที่ความดันสูงกว่า 1000 เมกะปาสกาล ณ อุณหภูมิห้อง การเปลี่ยนแปลงโดยทั่วไปของวัตถุชีวภาพที่ความดันสูงกว่า 100 เมกะปาสกาลเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบไม่ย้อนกลับ ดังนั้นการประยุกต์ใช้ความดันที่ 100-1000 เมกะปาสกาล กับอาหารจึงเป็นประโยชน์มาก โดยอาจใช้ความดันไม่เกิน 200 เมกะปาสกาล สำหรับผลที่ย้อนกลับได้ [17]

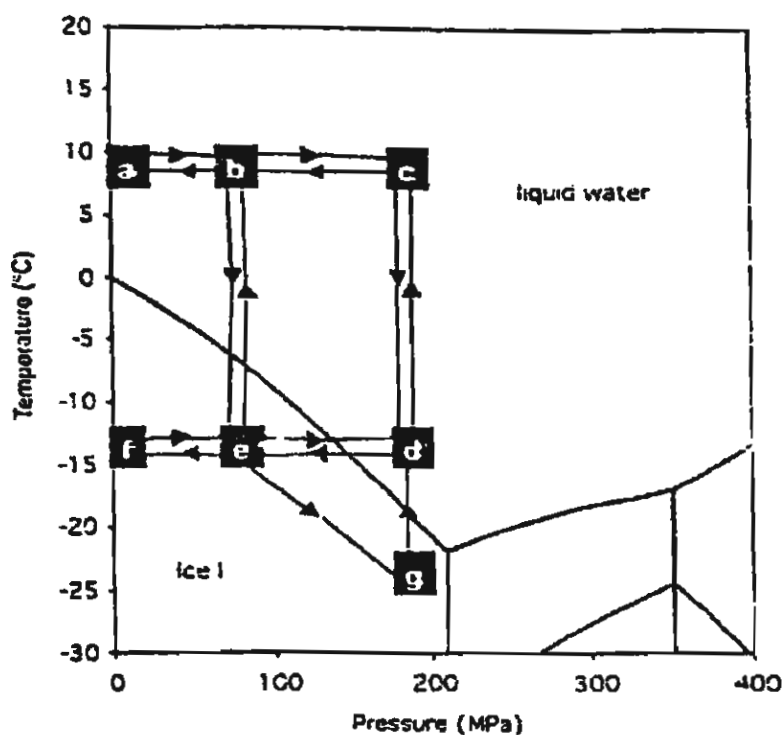
เทคโนโลยีความดันสูงมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของน้ำทางเทอร์โมไดนามิกส์ เช่น จุดเยือกแข็งของน้ำจะลดลงจาก 0 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 0 เมกะปาสกาล เป็น -20 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 200 เมกะปาสกาล ซึ่งสามารถนำคุณสมบัตินี้มาใช้ในการแช่แข็งอาหารที่มีปริมาณน้ำมาก โดยผลกระทบของความดันสูงในน้ำ [18] แสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงแผนภูมิการเปลี่ยนสถานะของน้ำที่ความดันต่างๆ [18]

การเปลี่ยนสถานะโดยนำความดันสูงเข้ามาใช้นั้น จะมีข้อแตกต่างดังนี้ ถ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะภายใต้ความดันคงที่ เรียกว่า pressure-assisted ส่วนถ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะโดยความดันเปลี่ยนแปลง เรียกว่า pressure shift และแบบสุดท้ายคือ pressure-induced คือการเปลี่ยนแปลงสถานะโดยเริ่มจากความดันเปลี่ยนแปลงและตามด้วยความดันคงที่ แสดงในรูปที่ 2.6 [18]

จากรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่า pressure shift freezing แสดงในช่วง acdf, pressure-induced thawing แสดงในช่วง fdca, pressure-assisted freezing แสดงในช่วง abef และ thawing แสดงในช่วง feba และการเก็บโดยปราศจากการแช่แข็ง แสดงในช่วง acd [18]

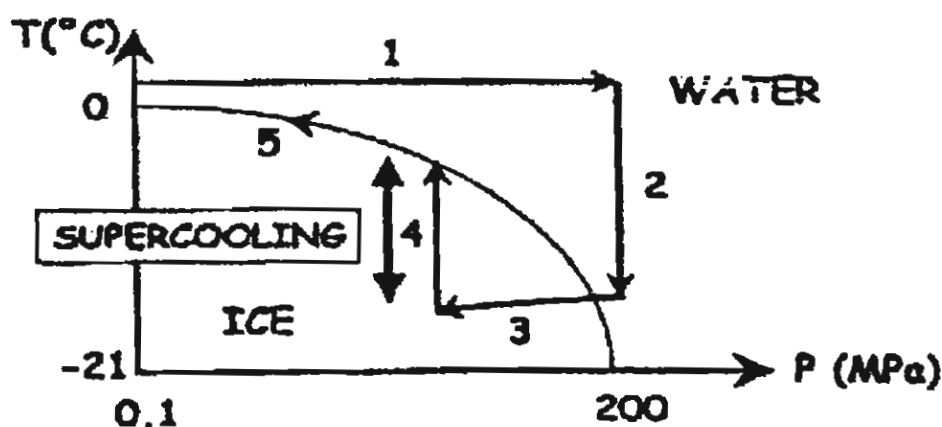


รูปที่ 2.6 แผนภูมิแสดงการแช่แข็งและการละลายด้วยความดันสูง [18]

การใช้ระบบความดันสูงในการแช่แข็ง เนื่องจากการบีบอัดลงบนตัวอาหารนั้น ทำให้พันธะโควาเลนต์ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงภายใต้สภาวะความดันสูง จึงมีผลให้วิตามิน กลิ่น และรสชาติไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่พันธะนอกโควาเลนต์ คือ โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ เช่น กรดนิวคลีอิก แป้ง ไขมัน และโพลีแซคคาไรด์จะเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้องค์ประกอบจะถูกทำลาย แต่หากเทียบกับการแช่แข็งด้วยวิธีธรรมดาจะเกิดการสูญเสียองค์ประกอบที่ถูกทำลายน้อยกว่า [17]

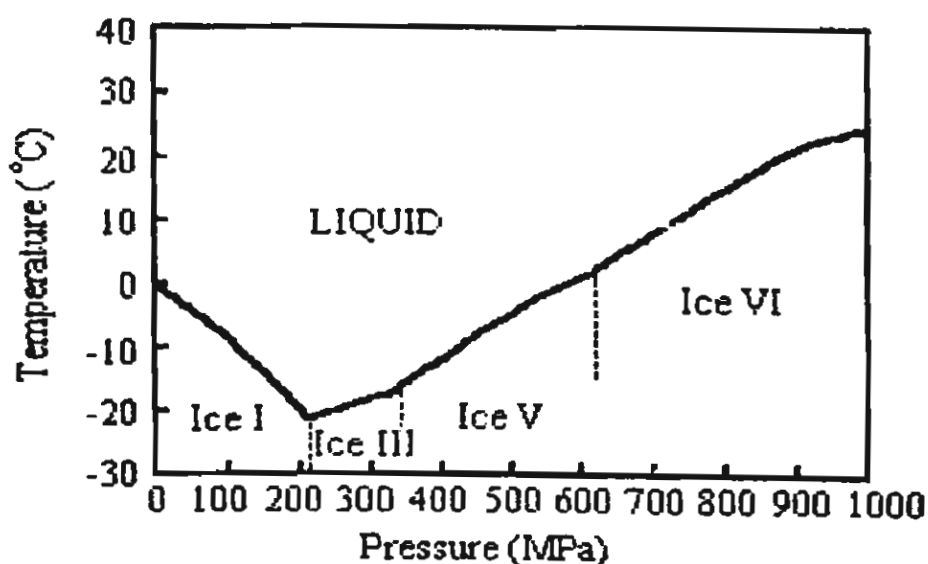
2.1.3.3 การนำความดันสูงเข้ามามีใช้ในการแช่แข็ง

การแช่แข็งอาหารนั้น ต้องการให้ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและเป็นโฮโมจีเนียส (ในช่วงของซูเปอร์คูลิ่ง ซึ่งจะทำให้เกิดนิวคลีอิกอย่างรวดเร็ว) เพื่อให้เนื้อเยื่อของอาหารนั้นไม่ถูกทำลาย และมีคุณภาพไม่เปลี่ยนแปลงไปมากจากเดิม [8]



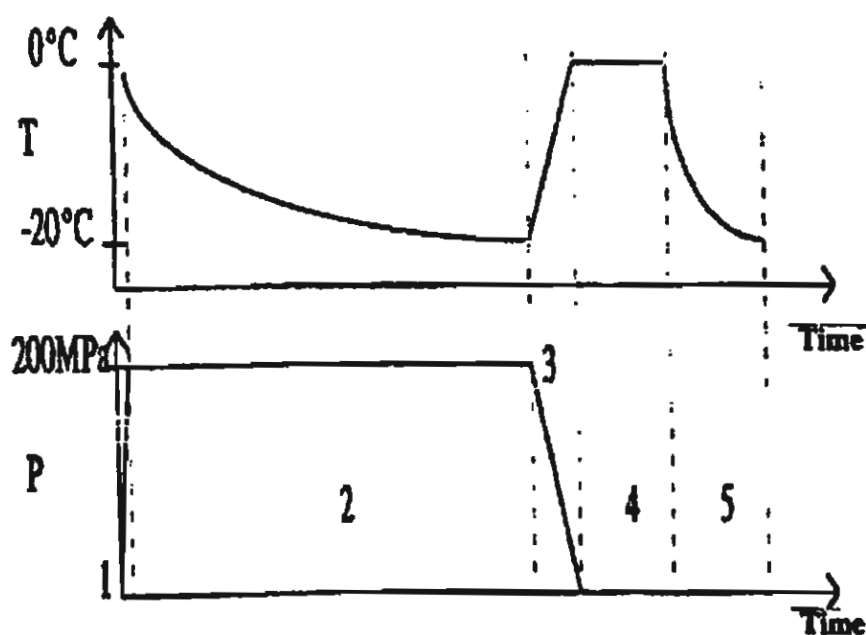
รูปที่ 2.7 แสดงกระบวนการแช่แข็งโดยความดันสูง [19]

จากรูปที่ 2.7 กล่าวคือ ขั้นตอนที่ 1-2 ตัวอย่างจะถูกแช่เย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็ง ขั้นตอนที่ 3-4-5 นั้น จะเกิดการปล่อยความดันอย่างรวดเร็ว ซึ่งขั้นตอนที่ 4 นั้น ถ้าช่วงซูเปอร์คูลิ่งมาก จะทำให้เกิดนิวคลีอิกมาก และเคลื่อนที่เข้าสู่สมดุล และขั้นตอนที่ 5 ความดันจะลดลงไปถึงความดันบรรยากาศ ซึ่งจะทำให้เกิดผลึกเติบโตขึ้น และจะเสร็จสิ้นกระบวนการที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส [19]



รูปที่ 2.8 แสดงการเปลี่ยนสถานะของน้ำไปเป็นน้ำแข็งที่ความดันต่างๆ [1]

จากรูปที่ 2.8 ผลึกน้ำแข็งแบบ I แสดงเมื่อน้ำแข็งตัวที่อุณหภูมิที่ความดันบรรยากาศจะทำให้ปริมาตรของน้ำเพิ่มขึ้น จึงก่อตัวเป็นผลึกน้ำแข็ง ซึ่งจะทำให้ความหนาแน่นน้อยลง ซึ่งแสดงได้ว่า ปริมาตรจะเพิ่มขึ้น 9% ที่อุณหภูมิแข็งตัวที่ 0 องศาเซลเซียส และปริมาตรจะเพิ่มขึ้นประมาณ 13% ที่ -2 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นผลให้เกิดการทำลายเซลล์เนื้อเยื่อของอาหารแช่แข็ง จากรูปที่ 2.8 นี้สรุปได้ว่า น้ำภายใต้ความดันนี้จะไม่แข็งตัวที่ 0 องศาเซลเซียส ผลึกน้ำแข็งแบบ VI สามารถเกิดผลึกได้ที่อุณหภูมิห้อง ที่ความดัน 900 เมกะปาสคาล หรือกล่าวได้ว่า อาหารสามารถแข็งตัวได้โดยปราศจากการทำให้เย็น จากรูปถ้าลดความดันลงจาก 600 เมกะปาสคาล ไปจนถึงความดันบรรยากาศ สถานะของน้ำจะเปลี่ยนจากผลึกน้ำแข็งแบบ VI → ผลึกน้ำแข็งแบบ V → ผลึกน้ำแข็งแบบ III → ของเหลว → ผลึกน้ำแข็งแบบ I (ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ) จึงได้นำหลักการนี้มาใช้ในการกระบวนการแช่แข็งด้วยความดันสูง เพื่อพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และทำให้เวลาลดลง ดังนั้นจึงทำให้เกิดผลึกเร็วขึ้น และเกิดผลึกที่มีขนาดเล็กๆ [1,7]



รูปที่ 2.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะความดัน และอุณหภูมิในการแช่แข็ง
(แบบ pressure shift freezing) [20]

จากรูปที่ 2.9 แสดงการแช่แข็งแบบความดันสูงโดยขั้นที่ 1 เมื่อใส่ตัวอย่างลงในเครื่องแช่แข็ง ความดันสูง อุณหภูมิจะอยู่ที่ 0 องศาเซลเซียส และเมื่อเพิ่มความดันถึง 200 เมกะปาสคาล ซึ่งในสถานะนี้น้ำยังคงเป็นของเหลวอยู่ ในขั้นที่ 2 เมื่อถึงความดันที่ต้องการปล่อยจนถึงอุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส จากนั้นเมื่อถึงขั้นที่ 3 ปล่อยความดันออกน้ำจะเริ่มเกิดเป็นผลึก ทำให้มีการคายพลังงานออกมา จึงทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น ต่อมาในขั้นที่ 4 ผลึกจะเติบโตขึ้นที่ความดันบรรยากาศ โดยผลึกที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กซึ่งจะทำลายเซลล์เนื้อเยื่อของอาหารน้อยกว่าเซลล์ขนาดใหญ่ ในขั้นตอนที่ 5 จะได้ตัวอย่างอุณหภูมิที่ต้องการ อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ [20]

2.1.3.3.1 การประยุกต์ใช้ pressure shift freezing ในอาหาร [18,21]

pressure shift freezing เมื่อทำการปล่อยความดัน จะมีช่วงซูเปอร์คูลถึงเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดนิวเคลียสขนาดเล็กขึ้น โดยจะเกิดตลอดทั่วทั้งตัวอย่าง และอุณหภูมิของตัวอย่างจะมีค่าต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส จนกระทั่งความร้อนแฝงออกไปหมด ประมาณ 36% ของปริมาณน้ำทั้งหมดในตัวอย่าง จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นน้ำแข็งเมื่อปล่อยความดันออกจาก 200 เมกะปาสคาล จนถึง 0.1 เมกะปาสคาล ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการ pressure shift freezing จะขึ้นอยู่กับขนาดของผลิตภัณฑ์ ปริมาณความร้อนแฝงที่ต้องการ

ในกระบวนการแช่แข็ง ได้มีการศึกษาผลกระทบระหว่างกระบวนการ pressure shift freezing ต่อเนื้อเยื่อและโครงสร้างของอาหารหลายชนิด ซึ่งผลที่ได้คือ เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กในการแช่แข็งของอาหาร

Koch et al (1996) กระบวนการ pressure assisted freezing เมื่อทดลองกับมันฝรั่งหั่นเป็นลูกบาศก์ พบว่าโครงสร้างของเซลล์ถูกทำลายน้อยกว่าการแช่แข็งวิธีธรรมดา รวมทั้งค่า drip loss และเอนไซม์ก็ถูกทำลายน้อยกว่าเช่นกัน

Martino et al. (1998) ได้นำเนื้อหมูมาศึกษาผลกระทบของกระบวนการ pressure assisted freezing กับวิธีการแช่แข็งแบบเป่า และแบบในโตรเจนเหลว พบว่าเนื้อหมูที่ผ่านกระบวนการ pressure assisted freezing จะได้ผลึกน้ำแข็งขนาดเล็ก ปรากฏทั้งในและนอกเซลล์ผิวหนังเนื้อหมู

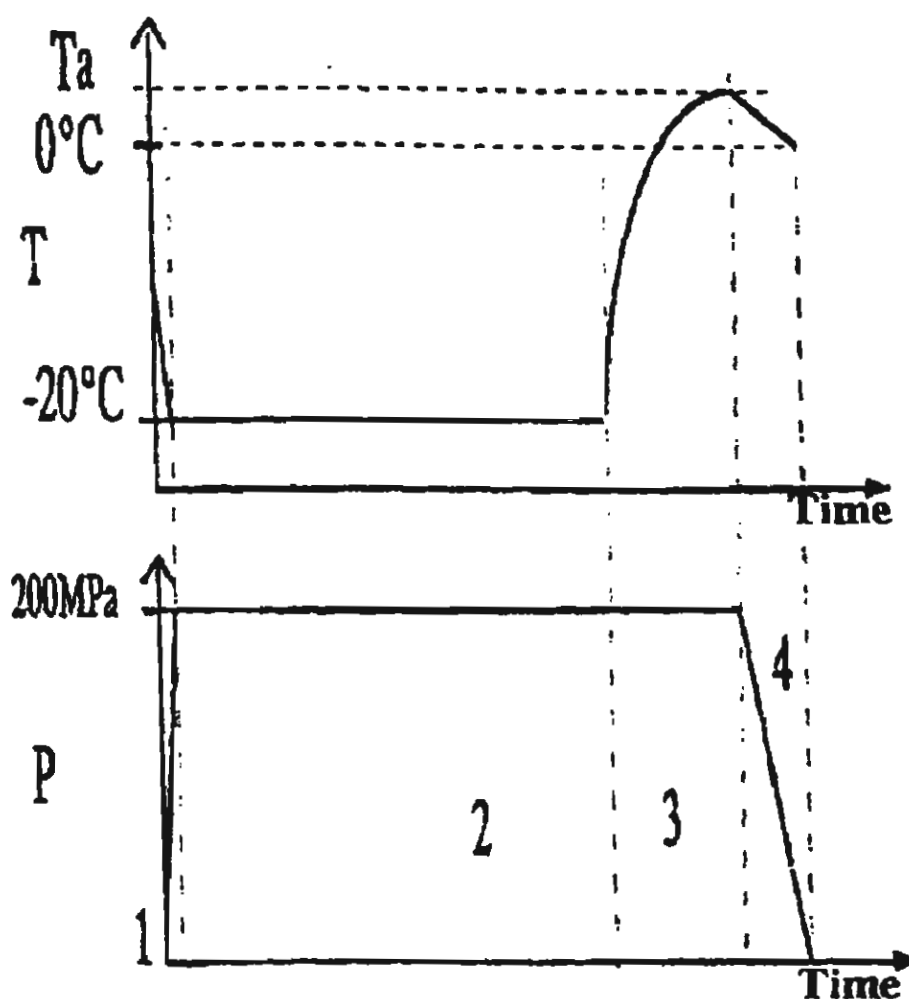
2.1.3.3.2 การประยุกต์ใช้ pressure assisted freezing ในอาหาร [21]

การ pressure assisted freezing คือการเปลี่ยนสถานะภายใต้ความดันคงที่ ขณะที่ค่าอุณหภูมิจะต่ำกว่าอุณหภูมิที่จุดเยือกแข็งของอาหาร โดยจะมีค่าความดันมากกว่าความดันบรรยากาศ เมื่อทำการให้ความเย็นกับตัวอย่างจากผิวไปยังตรงกลางของตัวอย่าง การเกิดนิวคลิอิกเกิดในโซนข้างนอกของตัวอย่าง และโตเข้าไปยังตรงกลางของตัวอย่างทันที

Hass et al. (1972) พบว่าการรักษาคุณภาพของผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์ ภายใต้ความดันที่ 0.3-10 เมกะปาสคาล ที่อุณหภูมิ -20 ถึง -25 องศาเซลเซียส ซึ่งสตรอเบอร์รี่ สับปะรด และกล้วยน้ำมาแช่แข็ง ภายใต้เงื่อนไขนี้จะทำให้เนื้อนุ่ม และสามารถกินได้โดยไม่ต้องทำการละลาย

2.1.3.4 การนำความดันสูงเข้ามาใช้ในการละลาย

ในการละลายอาหารนั้น โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมอาหารที่ต้องใช้เนื้อขนาดใหญ่แช่แข็งมาก่อนที่จะแปรรูปนั้น จะต้องนำมาละลายก่อนซึ่งจะใช้เวลานาน และทำให้คุณภาพเสื่อมลงไป จากการที่จุดเยือกแข็งของน้ำลดลงเมื่อเราเพิ่มความดันถึง 200 หรือ 210 เมกะปาสคาล ซึ่งจุดนี้น้ำแข็งจะผ่านการเปลี่ยนสถานะ และเมื่อปล่อยความดันจุดเยือกแข็งก็จะเพิ่มเข้าสู่จุดเยือกแข็งเดิม การนำความดันสูงเข้ามาใช้ในการละลายอย่างเร็ว นั้น จะทำให้อาหารนั้นยังคงมีคุณภาพเหมือนเดิม [21]



รูปที่ 2.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะความดัน และอุณหภูมิในการละลาย

กระบวนการละลายด้วยความดันสูง อธิบายได้ในรูปที่ 2.10 เริ่มตั้งแต่การนำตัวอย่างที่แข็งในที่นี้คือน้ำแข็งนำไปใส่ในเครื่อง เมื่อเราเพิ่มความดันมีผลให้อุณหภูมิลดลง แสดงในสถานะ 1 จากนั้นในระหว่างสถานะ 2 จะเกิดการละลาย ซึ่งจะสิ้นสุดที่สถานะนี้ จากนั้นในสถานะ 3 อุณหภูมิของตัวอย่างจะเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิห้องเนื่องจากการคายพลังงานออกมา แต่ความดันยังคงที่ ในสถานะ สุดท้าย (สถานะ 4) ความดันจะลดลงจนถึงความดันบรรยากาศ รวมถึงอุณหภูมิก็จะลดลงถึงอุณหภูมิที่บรรยากาศด้วย [11]

2.1.3.4.1 การประยุกต์ใช้ pressure-induced thawing ในอาหาร [9,22]

pressure-induced thawing หมายถึงการเปลี่ยนแปลงสถานะเนื่องจากเพิ่มความดัน ตัวอย่างเช่น Deuchi และ Hayashi (1992) ทดลองนำความดันที่ 200 เมกะปาสกาล และเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส พบว่ามีประสิทธิภาพในการละลายน้ำแข็งที่เตรียมจากการแช่แข็งที่ อุณหภูมิ -10 ถึง -30 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม อาจก่อให้เกิดการตกผลึกใหม่ในการละลาย ตัวอย่างในการลดความดันลง เนื่องจากอาจมีความร้อนไม่เพียงพอ

ความร้อนแฝงที่ต้องการใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็งจะลดลง ซึ่งการลดความร้อนแฝงนั้นจะช่วยลดเวลาที่ใช้ในการละลายลง

Pressure assisted thawing เป็นการเปลี่ยนแปลงสถานะจากน้ำแข็งไปเป็นน้ำ โดยเป็นการให้ความร้อนโดยอุณหภูมิกองที่ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเริ่มต้นของตัวอย่าง อัตราการเพิ่มความดัน ขนาดของผลิตภัณฑ์

ผลกระทบของ pressure-induced thawing ของอาหารคือ จะทำให้ลดเวลาที่ต้องการใช้ในการละลายอย่างสมบูรณ์ และมีคุณภาพดีกว่าการละลายแบบธรรมดา ส่วนผลกระทบในแง่ลบจะรวมถึง การเปลี่ยนสี ซึ่งขึ้นกับความดันที่ใช้ Deuchi และ Hayashi ได้รายงานผลว่าเนื้อวัวที่แช่แข็งที่ -20 องศาเซลเซียส ละลายที่ความดัน 50 เมกะปาสกาล โดยไม่มีการเปลี่ยนสี และปริมาณน้ำสูญเสีย (drip loss) มีค่าน้อยกว่า อย่างไรก็ตามความดันสูงมีผลให้ลักษณะโปรตีนเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เนื้อขาว เวลาที่ใช้ในการละลายที่ -10 องศาเซลเซียสที่ความดัน 120 เมกะปาสกาลใช้เวลาเพียงหนึ่งในสามของเวลาการละลายแบบธรรมดา

Chevalier (1994) ได้ศึกษาปัจจัย 4 ปัจจัยต่อปลาแผ่น ดังนี้ 1.ระดับความดัน (0.1-200 เมกะปาสกาล) 2. อัตราการแช่แข็ง 3. อัตราการเพิ่มความดัน (pressurization rate) 4. เวลาในการให้ความดันสำหรับใช้ในการละลาย (pressure holding time) พบว่าปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อเวลาในการละลาย ซึ่งอัตราการแช่แข็งจะมีผลต่อเนื้อเยื่อ อัตราการแช่แข็งเร็วจะมีผลต่อ drip loss เมื่อเวลาในการให้ความดันสำหรับใช้ในการละลายช้า จะทำให้เกิดการละลายช้า ทำให้ผลึกเกิดการรวมตัวกันใหม่

การเพิ่มอัตราการละลาย จะช่วยลดเวลาในการละลาย ส่วนค่าปริมาณน้ำที่สูญเสีย (drip loss) ต้องขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่นำมาละลาย

ประโยชน์ในการนำความดันเข้ามามีใช้ในการละลายคือ ช่วยลดเวลาในการละลาย ทำให้ใช้อุณหภูมิในการละลายลดลง ลดความเสี่ยงที่เกิดขึ้นในการละลายเช่น การตกผลึกใหม่ ผลกระทบต่อความเข้มข้นของสารในอาหาร และการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ pressure-induced thawing สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร และยา

2.1.3.5 ผลของความดันต่อจุลินทรีย์ [18]

เทคนิคการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบันคือ การใช้ความร้อน อย่างไรก็ตามการให้ความดันสูงก็มีผลในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์เหมือนกันโดยระดับของการฆ่าเชื้อขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ระดับความดัน เวลาที่ให้ความดัน ชนิดของจุลินทรีย์อุณหภูมิที่ใช้ และชนิดของอาหาร

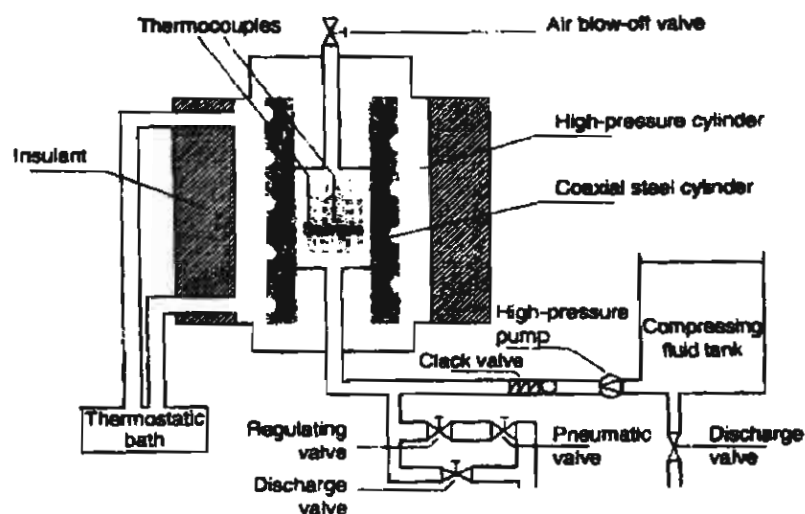
2.1.3.6 ผลกระทบต่ออาหาร [18]

การให้ความดันสูงเป็นการทำลายจุลินทรีย์ และเอนไซม์ รวมทั้งทำให้โปรตีน และโพลีแซคคาไรด์เสียสภาพ ข้อดีของเทคนิคดังกล่าวคือ อาหารยังคงมีกลิ่น รส และเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับวัตถุดิบเหมือนเดิม แต่มีอายุการเก็บรักษานาน ในประเทศสเปนมีการใช้เทคนิคการให้ความดันสูงในการพาสเจอร์ไรซ์แฮมสดได้เป็นเวลา 60 วันที่อุณหภูมิแช่เย็นกระบวนการฆ่าเชื้อโดยใช้ความดันสูงเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานต่ำ ใช้น้ำน้อย จึงมีข้อเสียในกระบวนการน้อย สามารถใช้กับภาชนะบรรจุแบบอ่อนตัวหรือกึ่งแข็งที่มีใช้อยู่ปัจจุบัน

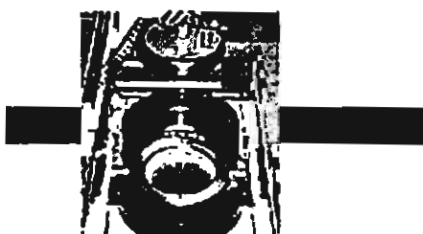
2.1.3.7 เครื่องมือ [18]

ตั้งแต่มีการนำเทคนิคการให้ความดันสูงมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย เช่น อุตสาหกรรมเซรามิก อุตสาหกรรมโลหะ แต่การนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเพิ่งจะสามารถทำได้เมื่อปลายทศวรรษ 1980 เมื่อมีการออกแบบเครื่องมือที่สามารถใช้กับอาหารได้นั่นเอง ความดันที่ใช้อยู่ในระดับ 100-900 เมกะปาสกาล

เครื่องมือที่ใช้ในอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหารด้วยความดันสูงคล้ายคลึงกับการแปรรูปโดยการใช้ความร้อน คือ เป็นระบบแบบกะ หรือต่อเนื่อง โดยทั่วไปเครื่องจะประกอบด้วยถังความดันสูงขนาด 10-50 ลิตร และเครื่องผลิตความดันสูง เมื่อวางอาหารในภาชนะบรรจุลงในถังแล้วจะปิดฝาบนเครื่อง ต่อจากนั้นจะเป็นการสูบล้างกลางในการให้ความดันซึ่งนิยมใช้น้ำเข้ามาทางใต้ถัง ความดันจะถูกส่งผ่านตัวกลาง และอาหารอย่างรวดเร็ว และสม่ำเสมอทั่วชิ้นอาหาร อาหารจะไม่เปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากได้รับความดันเท่ากันทุกด้าน รอบเวลาที่ใช้ทั่วไปเป็นเวลาสั้น ๆ ไม่เกิน 15 นาที เมื่อ ได้รับความดันตามที่ต้องการแล้ว ระบบปั๊มจะหยุด วาล์วปิด และความดันจะคงที่โดยที่ไม่จำเป็นต้องให้พลังงานแก่ระบบอีก



รูปที่ 2.11 แสดงอุปกรณ์ของระบบความดันสูง [4]



รูปที่ 2.12 แสดงเครื่องความดันสูงแบบ autoclave แบบปิดอย่างรวดเร็ว [10]

2.1.3.8 ประโยชน์ของการแช่แข็งอาหารด้วยความดันสูง [11,14]

1. ทำให้เซลล์อาหารถูกทำลายลดน้อยลง เนื่องจากการแช่แข็งด้วยความดันสูงจะทำให้เกิดผลึกเร็วขึ้น และเกิดผลึกที่มีขนาดเล็กลง
2. สามารถช่วยลดเวลาในการแช่แข็ง และการละลาย ซึ่งจะมีผลต่อการเกิดผลึก และการละลายผลึกของน้ำในอาหาร
3. ทำให้รสชาติ สี และความสดของอาหารยังคงสภาพเดิมอยู่
4. ทำให้ไม่เกิดการสูญเสียวิตามินซี
5. สามารถยืดเวลาในการเก็บรักษาอาหารได้มากกว่าการแช่แข็งด้วยวิธีธรรมดา
6. สามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารได้
7. สามารถประหยัดพลังงานในกระบวนการการแช่แข็ง
8. ลดปัญหาที่เกิดจากการนำอาหารไปผ่านกระบวนการถนอมอาหารด้วยความร้อน

2.1.4 การวัดคุณภาพอาหารที่ผ่านกระบวนการแช่แข็ง [11,22]

ตามทฤษฎีการวัดคุณภาพอาหารมีวิธีการวัดหลายวิธี เช่น การทดสอบทางเครื่องส่งสัญญาณที่ไวต่อแสง การวิเคราะห์เนื้อเยื่อ การเปลี่ยนสี การทดสอบทางจุลินทรีย์ ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (drip loss) และอื่นๆ แต่ในโครงการนี้ ทำการวัดคุณภาพอาหารโดยวัดค่าปริมาณน้ำที่สูญเสีย (drip loss) และการวิเคราะห์เนื้อเยื่อ

ปริมาณน้ำที่สูญเสีย จะทำการวัดได้เมื่อนำตัวอย่างที่ผ่านการแช่แข็ง ไปทำการละลายก่อน แล้วจึงนำมาวัดค่าปริมาณน้ำที่สูญเสีย (drip loss) และยังสามารถคำนวณหาปริมาณน้ำที่สูญเสีย (drip loss) หลังจากผ่านการต้ม (ตัวอย่างต้องผ่านการละลายก่อน)

2.1.4.1 drip loss

drip loss หรือ drip คือ ปริมาณน้ำของตัวอย่างที่สูญเสียไปจากตัวอย่างที่เริ่มต้น สามารถคำนวณได้จากสูตรที่ 2.4 [12]

$$Drip = \frac{drip\ mass\ (g)}{dry\ matter\ of\ the\ sample\ (g)} \times 100 \quad (2.1)$$

drip mass คือ น้ำหนักเริ่มต้น หักออกจาก น้ำหนักที่ผ่านการละลาย หรือการต้ม
dry matter of the sample คือ น้ำหนักของอาหารที่นำน้ำออกจากอาหารหมด

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 1996 Yoshioka Keiko และคณะ [2] ได้ทำการทดลอง โดยนำปูไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วัน โดยนำไปละลายที่ความดัน 100-300 เมกะปาสกาล ประมาณ 10 นาที ส่วนที่เหลือนำไปละลายด้วยวิธีปกติ พบว่าปูที่ละลายด้วยความดันสูง จะมีความสดคล้ายกับปูที่ยังสดอยู่ มากกว่าการละลายด้วยวิธีปกติ จากนั้นนำไปให้ความร้อนพบว่าเนื้อปูที่ผ่านการละลายด้วยความดันสูงจะนุ่มมากกว่าการละลายด้วยวิธีปกติ

ในปี 1997 Sanz P.D. และคณะ [3] ได้ทำการทดลองเรื่องการแช่แข็งของน้ำที่ความดันสูง โดยพิจารณาถึงอุณหภูมิลดลง ประโยชน์ที่ได้รับของกระบวนการความดันสูงนั้น จะทำให้น้ำในตัวอย่างอาหารนั้นเกิดผลึกน้ำแข็งเร็วขึ้น และมีโครงสร้างของผลึกเป็นแบบเดียวกัน โดยใช้การคำนวณเพื่อทำนายจำนวนการเกิดผลึกน้ำแข็ง

ปี ค.ศ. 1998 Martino และคณะ [4] ได้ทดลองการแช่แข็งด้วยความดันสูง โดยตัวอย่างถูกทำให้เย็นที่ความดัน 200 MPa ที่อุณหภูมิ -20°C ซึ่งไม่มีการเกิดเกล็ดน้ำแข็ง จากนั้นความดันลดลงเหลือ 0.1 MPa การเย็นตัวจะอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 20°C ซึ่งกระตุ้นให้เกิดนิวเคลียสของผลึกน้ำแข็งอย่างรวดเร็วและเป็นระเบียบ ขนาดและตำแหน่งของผลึกน้ำแข็งในชิ้นเนื้อซึ่งผ่านการแช่แข็งความดันสูง จะนำมาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบกับการใช้อากาศเป่าและการใช้ไนโตรเจนเหลว จากการทดลองพบว่าการใช้อากาศเป่าและการใช้ไนโตรเจนเหลวทำให้การกระจายตัวของผลึกน้ำแข็งไม่เป็นระเบียบ ส่วนการแช่แข็งความดันสูง พบว่าที่บริเวณพื้นผิวและศูนย์กลางผลึกน้ำแข็งมีขนาดเล็ก ซึ่งเทคนิคนี้เป็นประโยชน์สำหรับอุตสาหกรรมอาหารที่ต้องการให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็ก

ในปี ค.ศ. 1998 L.S.Bak และคณะ [5] ได้มีการทำการทดลองโดย กุ้งที่จับได้นำมาต้มด้วยน้ำทะเล แล้วบรรจุภัณฑ์แล้วนำมาแช่แข็ง ทดลองเปรียบเทียบ 2 วิธีระหว่างบรรจุภัณฑ์ที่ใช้อากาศทั่วไปและบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ไนโตรเจนแทนที่อากาศ และทดลองเก็บในสถานะที่ต่างกันดังนี้ แบบโดนแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์หรือแบบเก็บในที่มืด รวมทั้งเก็บในที่อุณหภูมิคงที่และเก็บในที่ที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงคุณภาพสามารถตรวจสอบได้โดยใช้วิธี การประเมินทางความรู้สึกร่วมกับ การวิเคราะห์ทางเคมีและฟิสิกส์ สรุปบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ไนโตรเจนแทนที่อากาศให้คุณภาพดีกว่าทั้งในเรื่องสีที่ชัดเจน เรื่องกลิ่นเหม็นหืน และความเหนียวแน่นของเนื้อ ส่วนการถูกแสงอิทธิพลต่อสีชัดเจนและการเกิดปฏิกิริยาในไขมัน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีผลมากต่อการเกิดเกล็ดน้ำแข็งในบรรจุภัณฑ์อย่างมาก สำหรับสาเหตุการเปลี่ยนแปลงคุณภาพมีดังนี้ การชัดเจนของสีเกิดเนื่องจากกุ้งที่ถูกต้ม รังควัตถุจะเปลี่ยนแปลงเป็นสีแดงแล้วในระหว่างเก็บในที่เย็น สีแดงค่อย ๆ จางปรากฏเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของสีเรียกว่า ไฟไดออกซิเดชั่น การเกิดกลิ่น

เหมีน เนื่องจากบริเวณใต้เปลือกกุ้งส่วนมากจะพบไขมันไม่อิ่มตัว ถ้าไขมันชนิดนี้ถูกแสงหรือก๊าซออกซิเจน จะเกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดกลิ่นเหมีนและรสชาติเปลี่ยนไป ส่วนสำหรับการป้องกันการคั่งน้ำออกมาจากกุ้งในระหว่างแช่แข็ง จึงมีการเคลือบด้วยน้ำทะเล ดังนั้นถ้าหากพบว่าเกิดเกล็ดน้ำแข็งในห่อบรรจุภัณฑ์ แสดงว่าเกิดการคั่งน้ำออกมาจากกุ้ง ทำให้ผู้บริโภคไม่เห็นสีและขนาดของกุ้ง ยิ่งกว่านั้นทำให้เห็นว่าบรรจุภัณฑ์นี้ประกอบด้วยน้ำมากกว่าเนื้อกุ้ง ส่วนคุณค่าทางโปรตีนลดลงเนื่องจากไขมันเกิดการออกซิเดชันกลายเป็นอนุมูลอิสระแล้วอนุมูลนี้เข้าไปทำลายโปรตีนกลายเป็นสารชนิดอื่น

ในปี 2001 Rouille J. และคณะ [6] ได้เสนอผลการทดลองว่า เนื่องจากจุลหอยของน้ำจะลดลงภายใต้ความดัน ที่ความดัน 220 เมกะปาสกาล จุลหอยของน้ำจะลดลงเหลือ -22 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการละลายอาหารอย่างรวดเร็ว และยังทำให้อาหารที่ถูกละลายมีคุณภาพดีขึ้น ซึ่งนำมาทดลองกับอาหารทะเล ได้แก่ ปลา Spiny dogfish และหอยแครง โดยนำมาเปรียบเทียบกับ การละลายด้วยความดันสูง และการละลายที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งเปรียบเทียบโดยใช้ค่า drip loss โดยคำนวณหลังจากการละลาย และหลังจากการคั่ว ซึ่งจากผลการทดลองทำให้ทราบว่า การละลายด้วยความดันสูงจะสามารถทำให้ค่า drip loss ลดลง

ในปี 2003 Antonio D. และคณะ [24] ได้เสนอผลการทดลองว่าการแช่แข็งแบบธรรมดา (เป็นน้ำแข็งแบบ I) ทำให้โครงสร้างของเนื้อเยื่อแตกแยก การแช่แข็งจนกลายเป็นน้ำแข็งแบบ VI พบว่าช่วยรักษาโครงสร้างได้ การเกิดน้ำแข็งแบบ VI แสดงให้เห็นว่าไม่มีรอยของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเส้นใยกล้ามเนื้อเมื่อเทียบกับการแช่แข็งจนน้ำแข็งแบบ I ซึ่งเกิดความเสียหายมากกว่า ความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรการแช่แข็งสัมพันธ์กับเฟสของน้ำแข็งทั้ง 2 แบบ โดยน้ำแข็งแบบ VI จะเกิดที่ความดันสูงเท่านั้น (632.4-2216 เมกะปาสกาล) แต่สามารถก่อตัวและเก็บที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งพบว่าการเกิดนิวเคลียสนั้นต้องการคิริของซูเปอร์คูลลิ่งที่สูงกว่าการแช่แข็งที่เกิดน้ำแข็งแบบ I สำหรับน้ำบริสุทธิ์และเนื้อ

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

ในการทดลองการแช่แข็ง และการละลายกึ่งด้วยความดันสูง ในโครงการนี้จะวัดค่าของคุณภาพของกึ่งจากการคำนวณหาค่า drip loss โดยจะมาเปรียบเทียบกับวิธีการแช่แข็ง และละลายด้วยวิธีธรรมดา และวิเคราะห์เนื้อเยื่อของอาหารด้วยกล้องจุลทรรศน์

3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ทั้งการทดลองแบบธรรมดาและแบบความดันสูงจะใช้กึ่งกุลาดำจากตลาดมหาชัย จังหวัดสมุทรสาคร เตรียมดังนี้

1. กึ่งปอกเปลือก แบ่งเป็น 2 ขนาด ขนาดที่ 1 ยาวประมาณ 14 เซนติเมตร ขนาดที่ 2 ยาวประมาณ 11 เซนติเมตร
2. กึ่งปอกเปลือก แบ่งเป็น 2 ขนาด ขนาดที่ 1 ยาวประมาณ 9 เซนติเมตร ขนาดที่ 2 ยาวประมาณ 6 เซนติเมตร
3. กึ่งนำไปหั่นเป็นชิ้นขนาดที่ 1 0.8x0.8x0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตร และขนาดที่ 2 1x1x1 ลูกบาศก์เซนติเมตร

3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์

1. เครื่องความดันสูง รายละเอียดแสดงในรูปที่ 3.1
2. เครื่องสุบลมให้ความดันสูง รุ่น DSXHF-452 ยี่ห้อ Haskel ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. เครื่องสุบรุ่น CP46 ยี่ห้อ Dee Pumps ประเทศอิตาลี
4. ตู้แช่แข็งรุ่น MDF-592 ยี่ห้อ Sanyo ประเทศญี่ปุ่น
5. เครื่องอัดอากาศ (compressor)
6. เครื่องชั่งน้ำหนัก
7. อ่างค้ำน้ำ (water bath)
8. ตู้อบ
9. เทอร์โมคัปเปิลชนิด K และมอนิเตอร์รุ่น ITM Series
10. เครื่องปิดปากถุง และถุงพลาสติกโพลิเอทิลีน

3.3 สารเคมี

1. ไนโตรเจนเหลว
2. น้ำมันซิลิโคน ชนิด M60.115.05

3.4 การอบแห้งด้วยตู้อบ (หาค่าน้ำหนักแห้ง หรือ dry matter)

1. เตรียมกึ่งเหมือนที่ใช้ในการทดลองมาชั่งน้ำหนักก่อนการทดลอง จดน้ำหนักที่ได้
2. นำกึ่งทั้ง 3 แบบ เข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
3. ครบกำหนดแล้ว นำกึ่งออกมาชั่งน้ำหนัก ซึ่งค่าที่ได้คือค่าน้ำหนักแห้ง (dry matter)

3.5 การทดลองการแช่แข็งแบบดั้งเดิม

3.5.1 การแช่แข็ง

1. นำกึ่งที่เตรียมไว้มาชั่งน้ำหนัก บรรจุใส่ถุงลงละ 1 ชิ้น
2. นำไปแช่ในตู้แช่แข็งเป็นเวลา 1 คืน

3.5.2 การละลาย

1. นำกึ่งที่ผ่านการแช่แข็งมาใส่ถาดที่มีน้ำรองอยู่
2. นำถาดไปวางในตู้อบที่ตั้งอุณหภูมิไว้ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที
3. เมื่อครบกำหนด นำกึ่งออกจากถาดมาชั่งน้ำหนัก
4. ทำซ้ำข้อ 1 ถึงข้อ 3 อีก 2 การทดลอง โดยกำหนดให้ข้อ 2 ทำการเปลี่ยนเวลาในการละลายเป็น 30 และ 45 นาทีตามลำดับ เพื่อทำการเปรียบเทียบหาเวลาในการละลาย

3.5.3 การต้ม

1. ตั้งอุณหภูมิที่อ่างน้ำ (water bath) ไว้ 80 องศาเซลเซียส
2. นำกึ่งที่ผ่านการละลายมาบรรจุใส่ถุงใหม่ ถุงละ 1 ชิ้น
3. นำมาต้มในอ่างน้ำ (water bath) เป็นเวลา 5 นาที
4. เมื่อครบกำหนด นำออกจากถุงและนำมาชั่งน้ำหนัก

3.5.4 การวิเคราะห์คุณภาพ

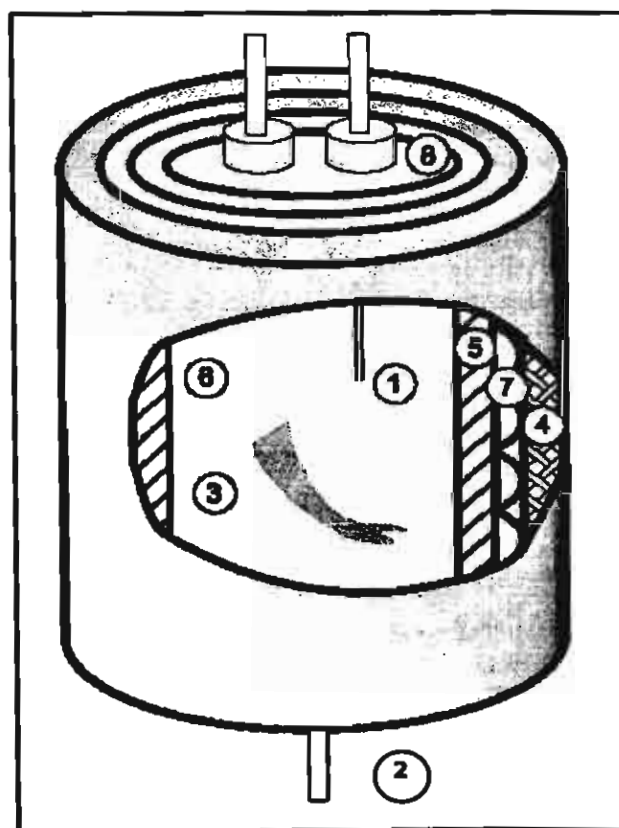
การวิเคราะห์ค่า drip loss และเงื่อนไขต่าง ๆ เช่น ความดัน เวลา ขนาดของกึ่ง เพื่อนำมาเปรียบเทียบหาเงื่อนไขที่ดีที่สุด

1. ในส่วนการแช่แข็ง การละลาย และการต้ม นำค่า drip loss ที่วิธีการใช้ความดันสูง และไม่ใช้ความดันสูง มาเปรียบเทียบกัน

2. จากนั้น นำผลของค่า drip loss ในกระบวนการที่ใช้ความดันสูงทั้งการแช่แข็ง การละลาย และการต้ม มาเปรียบเทียบกับกันโดย
 - 2.1 แยกเป็นขนาดของตัวกึ่ง
 - 2.2 จากนั้นในขนาดตัวกึ่งนำมาแยกตามเงื่อนไขของความดัน
 - 2.3 เปรียบเทียบหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในตัวกึ่งขนาดต่าง ๆ

3.6 ส่วนประกอบของเครื่องถนอมด้วยอาหารความดันสูง

เครื่องถนอมอาหารด้วยความดันสูง ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังแสดงในรูป 3.1

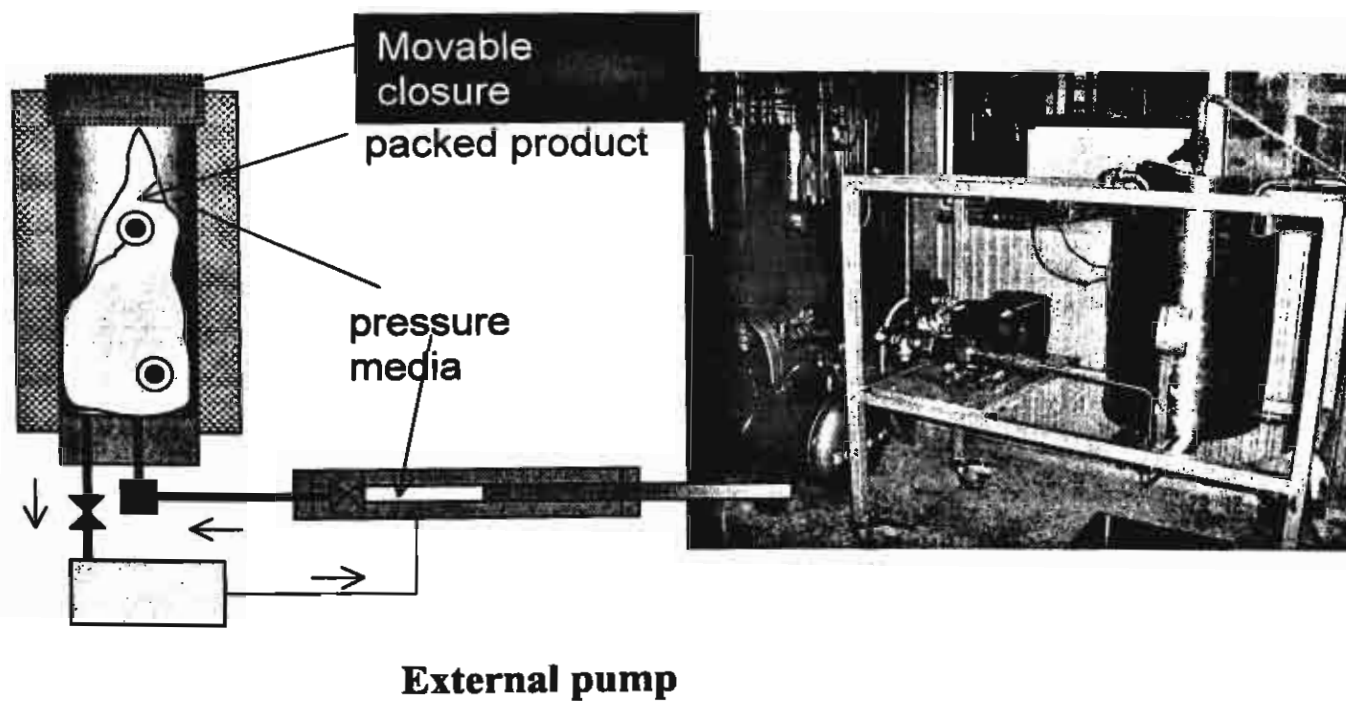


รูปที่ 3.1 แสดงแบบของเครื่องถนอมอาหารด้วยความดันสูง

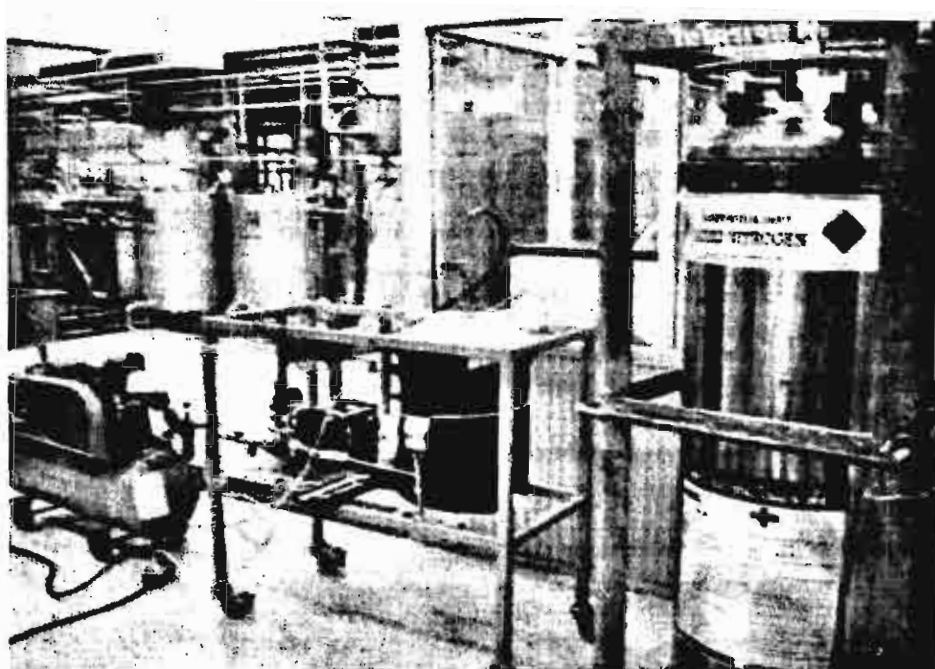
โดยหมายเลขจะแสดงอุปกรณ์ดังนี้

1. เทอร์โมคัปเปิล
2. ทางเข้าน้ำมันซิลิโคน
3. ตัวอย่างบรรจุในถุง
4. ฉนวน
5. ถึงความดันสูง
6. น้ำมันซิลิโคน
7. เสือสูบ
8. ฝาปิด

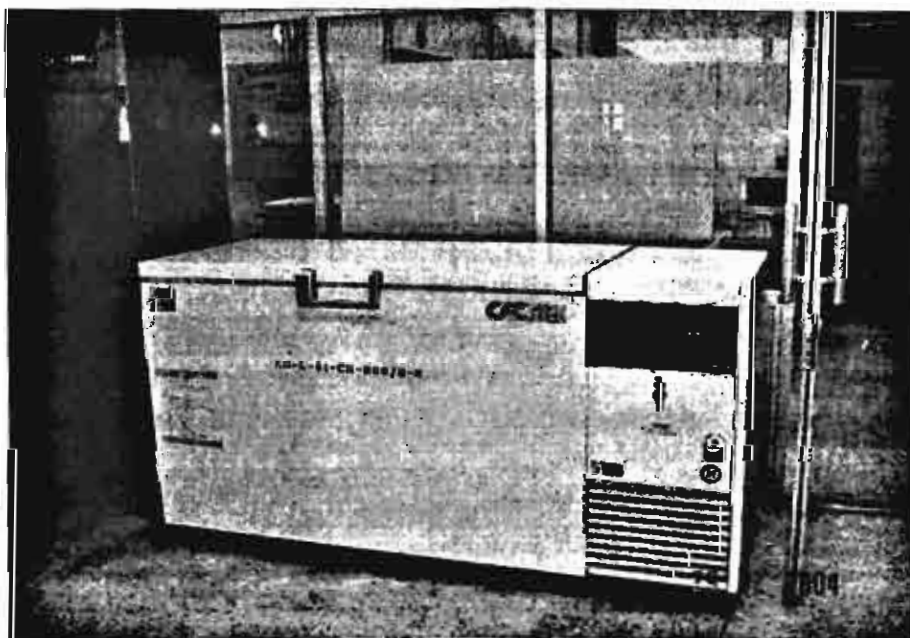
Indirect pumping (batch)



รูปที่ 3.2 แสดงภาพถ่ายจริงของเครื่องความดันสูงเทียบกับต้นแบบ



รูปที่ 3.3 แสดงเครื่องถนอมอาหารความดันสูง



รูปที่ 3.4 แสดงตู้แช่แข็งแบบดั้งเดิม

3.7 การทดสอบเครื่องถนอมอาหารด้วยความดันสูง

3.7.1 การทดสอบการละลายด้วยเครื่องถนอมอาหารด้วยความดันสูง

1. เตรียมกึ่งทั้ง 3 ขนาด (ตามข้อที่ 3.1) โดยการทดลอง 1 ครั้งจะใช้กึ่งทั้ง 3 ขนาด ใส่ในเครื่องถนอมอาหารด้วยความดันสูง
2. หาค่าน้ำหนักแห้ง (dry matter) จากกึ่งที่เตรียมไว้ (ตามข้อที่ 3.4)
3. การแช่แข็ง
 - 3.1 นำกึ่งที่เตรียมไว้มาชั่งน้ำหนัก และบรรจุใส่ถุงถุงละ 1 ตัว
 - 3.2 นำมาแช่ที่ตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
4. การทดลองการละลายด้วยวิธีดั้งเดิม (เพื่อเป็นตัวแทนเปรียบเทียบ)
 - 4.1 นำตัวอย่างใส่ถาดที่เตรียมไว้ เป็นเวลา 30 นาที
 - 4.2 เมื่อครบกำหนด นำออกจากถาด และนำมาชั่งน้ำหนัก
 - 4.3 นำมาบรรจุใส่ถุงใหม่ และนำไปต้มที่อ่างน้ำ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที
 - 4.4 เมื่อครบกำหนด นำออกจากถาด และนำไปชั่งน้ำหนัก
 - 4.5 แล้วนำมาวิเคราะห์หาค่าปริมาณน้ำสูญเสีย (drip loss) ตามสูตรที่ 2.1
5. การทดลองการละลายด้วยวิธีความดันสูง โดยใช้เวลาในการละลายเท่ากัน
 - 5.1 นำตัวอย่างกึ่งทั้งที่แช่แข็งไว้มาใส่เครื่องถนอมอาหารด้วยความดันสูง
 - 5.2 เปิดเครื่อง เพื่อสูบน้ำมันซิลิโคน และความดันเข้าสู่ระบบ
 - 5.3 ปรับความดันที่ 500 บาร์ และเวลาที่ใช้ละลาย 10 นาที
 - 5.4 เมื่อครบเวลาทำการปล่อยความดันจนถึง 0 บาร์
 - 5.5 นำตัวอย่างออกมาจากถาด แล้วชั่งน้ำหนัก
 - 5.6 จากนั้นบรรจุใส่ถุงพลาสติกใหม่ นำไปต้มที่อ่างน้ำ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที
 - 5.7 จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาค่าปริมาณน้ำที่สูญเสีย (drip loss) ตามสูตรที่ 2.1
 - 5.8 ทำการทดลองซ้ำในข้อ 5.1-5.7 อีก 4 การทดลอง โดยกำหนดให้ข้อ 5.3 เปลี่ยนความดันเป็น 1,000 1,500 และ 2,000 บาร์
 - 5.9 ทำการทดลองซ้ำในข้อ 5.1-5.8 อีก 4 การทดลอง โดยกำหนดให้ข้อ 5.3 ทำการลดเวลาในการละลายเป็น 5 4 3 และ 2 นาที

3.7.2 การทดสอบการแช่แข็งด้วยไนโตรเจนเหลว

1. ทำการปล่อยความดันของถังไนโตรเจนเหลว
2. เปิดวาล์วให้ไนโตรเจนเหลวเข้าถึงทนความดันสูง จนอุณหภูมิภายในถังคงที่ (-20 องศาเซลเซียส)
3. นำตัวอย่างทั้งกิ่งมีเปลือก กิ่งไร้เปลือก และกิ่งหั่นมาใส่ในถังทนความดันสูง เพิ่มความดันถึง 2000 บาร์ จับเวลา 10 นาที
4. นำตัวอย่างที่ได้มาคำนวณปริมาณน้ำสูญเสีย (drip loss) ตามสูตรที่ 2.1 เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่แช่แข็งแบบดั้งเดิมเป็นเวลา 1 วัน ทำการละลายด้วยวิธีดั้งเดิมที่ 30 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และทำการดัมที่ 80 องศาเซลเซียส เวลา 5 นาที
5. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-3 อีก 1 การทดลอง จากนั้นนำมาอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ (Freeze Dry) เพื่อนำตัวอย่างที่ได้ไปส่องกล้อง SEM (Scanning Electron Microscope)

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 การทดลองการแช่แข็ง และการละลายด้วยวิธีดั้งเดิม

4.1.1 การหาค่าน้ำหนักแห้ง

ในการทดลองหาค่าน้ำหนักแห้ง (dry matter) เพื่อนำมาคำนวณหาค่าปริมาณน้ำที่สูญเสีย (drip loss)

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้ง (dry matter) ของกุ้งขนาดต่างๆ

ลักษณะตัวอย่างกุ้ง	ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้ง (dry matter, กรัม)
- กุ้งไม่ลอกเปลือก ขนาดที่ 1 ยาว 14 ซม. ขนาดที่ 2 ยาว 11 ซม.	8.7218 8.5498
- กุ้งลอกเปลือก ขนาดที่ 1 ยาว 9 ซม. ขนาดที่ 2 ยาว 6 ซม.	2.9339 2.6916
- กุ้งหั่นเป็นชิ้น 0.8 x 0.8 x 0.8 ซม. ³ 1 x 1 x 1 ซม. ³	0.7260 0.7548

4.1.2 การหาค่าปริมาณน้ำที่สูญเสีย (drip loss)

ตารางที่ 4.2-4.4 แสดงค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำที่สูญเสีย (drip loss) หลังการละลายที่เวลาต่างๆ และการต้มที่เวลา 5 นาที อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จากการทดลองการแช่แข็ง และการละลายด้วยวิธีดั้งเดิม คำนวณหาค่าปริมาณน้ำที่สูญเสียได้จากสมการที่ 2.1 ตัวอย่างแสดงในภาคผนวก ก

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำที่สูญเสีย (drip loss) ของการทดลองด้วยวิธีดั้งเดิม ที่เวลาการ
ละลาย 15 นาที

ลักษณะตัวอย่างกุ้ง	ปริมาณน้ำสูญเสีย (drip loss)		
	หลังการละลาย (กรัม / 100 กรัม DM)	หลังการต้ม (กรัม / 100 กรัม DM)	ปริมาณรวม (กรัม / 100 กรัม DM)
- กุ้งไม่ลอกเปลือก			
ขนาดที่ 1 ยาว 14 ซม.	4.5725	8.6427	13.2152
ขนาดที่ 2 ยาว 11 ซม.	6.7522	18.2180	24.9702
- กุ้งลอกเปลือก			
ขนาดที่ 1 ยาว 9 ซม.	7.8735	31.4837	39.3572
ขนาดที่ 2 ยาว 6 ซม.	2.5635	30.5840	33.1475
- กุ้งหั่นเป็นชิ้น			
0.8 x 0.8 x 0.8 ซม. ³	2.7689	36.1553	38.9242
1 x 1 x 1 ซม. ³	3.1399	50.9671	54.1070

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำที่สูญเสีย (drip loss) ของการทดลองด้วยวิธีดั้งเดิม ที่เวลาการ
ละลาย 30 นาที

ลักษณะตัวอย่างกุ้ง	ปริมาณน้ำสูญเสีย (drip loss)		
	หลังการละลาย (กรัม / 100 กรัม DM)	หลังการต้ม (กรัม / 100 กรัม DM)	ปริมาณรวม (กรัม / 100 กรัม DM)
- กุ้งไม่ลอกเปลือก			
ขนาดที่ 1 ยาว 14 ซม.	4.5667	10.9198	15.4865
ขนาดที่ 2 ยาว 11 ซม.	5.3732	15.7583	21.1315
- กุ้งลอกเปลือก			
ขนาดที่ 1 ยาว 9 ซม.	7.1236	43.1201	50.2437
ขนาดที่ 2 ยาว 6 ซม.	2.4038	44.6426	47.0464
- กุ้งหั่นเป็นชิ้น			
0.8 x 0.8 x 0.8 ซม. ³	3.1543	45.0689	48.2232
1 x 1 x 1 ซม. ³	9.1282	64.5866	73.7148

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำที่สูญเสีย (drip loss) ของการทดลองด้วยวิธีดั้งเดิม ที่เวลาการ
ละลาย 45 นาที

ลักษณะตัวอย่างกุ้ง	ปริมาณน้ำสูญเสีย (drip loss)		
	หลังการละลาย (กรัม / 100 กรัม DM)	หลังการต้ม (กรัม / 100 กรัม DM)	ปริมาณรวม (กรัม / 100 กรัม DM)
- กุ้งไม่ลอกเปลือก			
ขนาดที่ 1 ยาว 14 ซม.	4.3317	11.6937	16.0107
ขนาดที่ 2 ยาว 11 ซม.	6.1136	15.0542	21.1678
- กุ้งลอกเปลือก			
ขนาดที่ 1 ยาว 9 ซม.	6.5680	48.9076	55.4756
ขนาดที่ 2 ยาว 6 ซม.	4.2577	43.6692	47.9269
- กุ้งหันเป็นชิ้น			
0.8 x 0.8 x 0.8 ซม. ³	3.7879	66.1295	69.9174
1 x 1 x 1 ซม. ³	2.8237	50.9671	90.0964

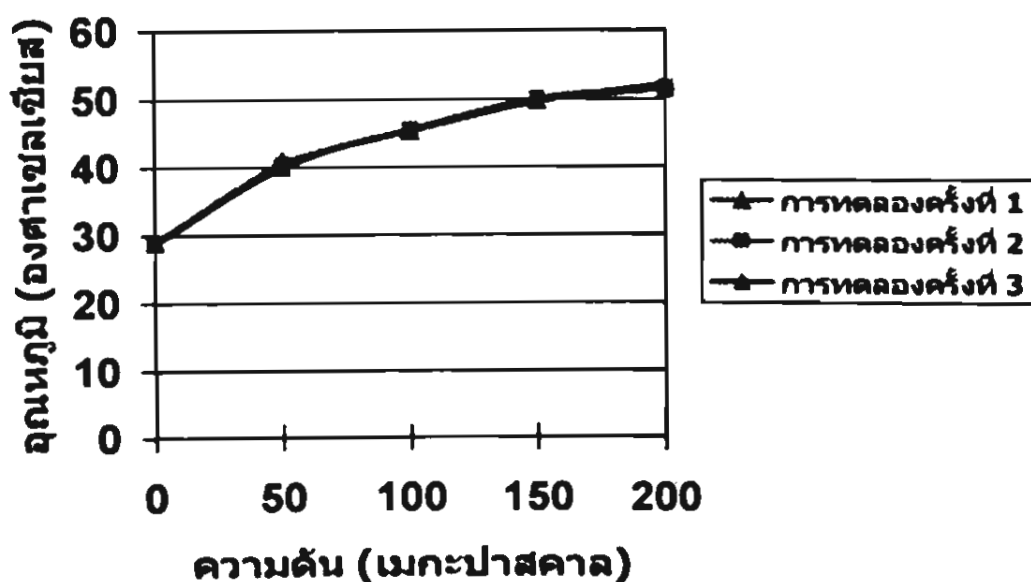
4.2 ผลการทดสอบเครื่องถนอมอาหารความดันสูง

4.2.1 การวัดอุณหภูมิที่ความดันต่างๆ

ตารางที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ความดันต่างๆ

ความดัน (เมกะปาสคาล)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	28.9	29.1	28.8	28.9
50	41.1	40.4	39.9	40.5
100	45.2	45.6	45.5	45.4
150	49.8	50.1	49.6	49.8
200	51.4	51.7	52.2	51.8

เมื่อนำความดัน และอุณหภูมิในตารางที่ 10 มาวาดกราฟได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ความดันต่างๆ

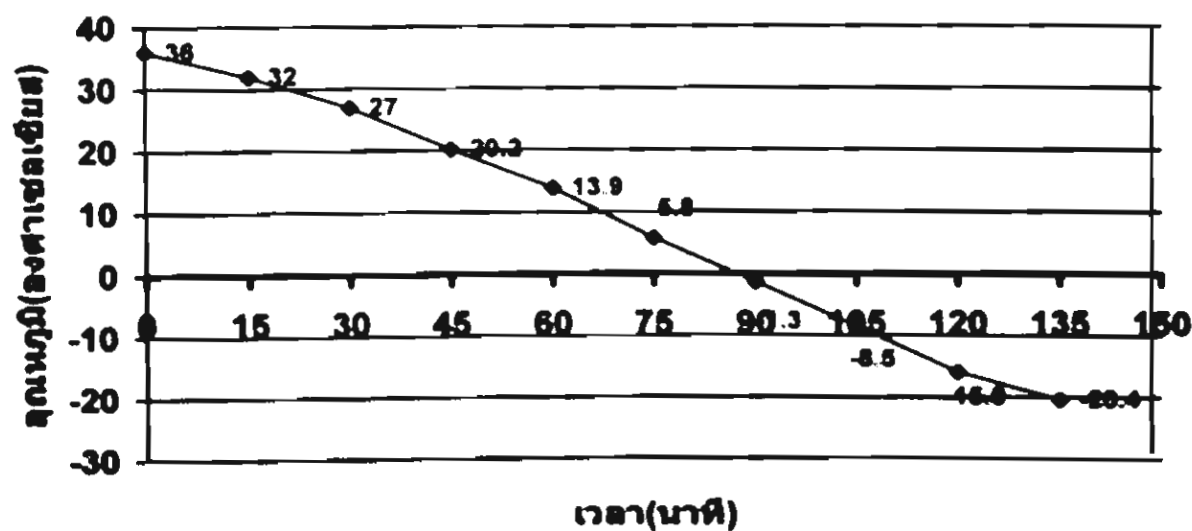
4.2.2 การวัดอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ

เมื่อให้ความเย็นกับระบบจนอุณหภูมิลดลงถึง -20 องศาเซลเซียส พบว่าใช้เวลาทั้งหมด 2 ชั่วโมง 15 นาที ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ

เวลา (นาที)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	34	32.0	27.0	20.2	13.9	5.8	-1.3	-8.5	-15.9	-20.4

วาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการทดลอง

4.3 การทดสอบการละลายด้วยถังความดันสูง

1. การทดลองหาค่าน้ำหนักแห้ง (dry matter) สามารถหาค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งของกึ่งกลาดำได้ดังนี้

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งของกึ่งที่ใช้ในการทดลองการละลายด้วยถังความดันสูง

ลักษณะตัวอย่างกึ่ง	ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้ง (dry matter, กรัม)
กึ่งไม่ลอกเปลือกขนาด 11 ซม.	4.0511
กึ่งลอกเปลือกขนาด 6 ซม.	2.0533
กึ่งหั่นเป็นชิ้นขนาด 1 x 1 x 1 ซม. ³	0.4520

2. การหาค่าปริมาณน้ำสูญเสีย (drip loss) นำค่าน้ำหนักแห้งที่ได้ไปคำนวณหาค่าปริมาณน้ำสูญเสีย (drip loss) ได้ผลตามตารางที่ 4.6 ถึง 4.10 ดังนี้