บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

ไก่กระทงหรือไก่เนื้อ หมายถึง ไก่ที่อยู่ในช่วงที่เป็นไก่วัยรุ่นซึ่งเป็นระยะกึ่งกลางระหว่างระยะที่เป็นลูกไก่หรือไก่เล็กกับไก่ที่โตเต็มวัย เนื้อของไก่กระทงจะให้รสชาติที่ดี ผิวหนังเรียบกระดูกอ่อนและเนื้อนุ่มกว่าไก่ที่โตเต็มที่แล้ว (ลิขิต เอียดแก้ว, 2532) เมื่อนำไก่กระทงมาชำแหละเป็นชิ้นส่วนต่างๆสามารถแสดงได้ดังตาราง

ตารางที่ 1 แสดง % ของชิ้นส่วนต่างๆของไก่กระทงที่ผ่านการชำแหละ
(สุวรรณ เกษตรสุวรรณ, 2529)

ชิ้นส่วน	น้ำหนัก (%)	
	ไก่เพศผู้	ไก่เพศเมีย
ต้นขา	34.1	32.4
หน้าอก	25.7	25.4
หลังและซี่โครง	17.0	16.6
ปีก	13.3	13.6
คอ	4.1	3.5
กึ๋น	4.1	3.5
ตับ	2.8	2.6
หัวใจ	0.7	0.6

เนื้อบริเวณหน้าอกของไก่กระทงเป็นชิ้นส่วนที่นิยมในหมู่ผู้บริโภค โดยเฉพาะเนื้อหน้าอกที่ผ่านการปรุงสุกเรียบร้อยแล้วได้รับความนิยมมากในประเทศแถบยุโรป นิยมใช้ประกอบอาหารในโรงแรม ภัตตราคาร ต่างๆ เช่น ใช้โรยหน้าสลัด (Sebranek , 1995) ดังนั้นการถนอมรักษาคุณภาพของเนื้ออกไก่กระทงสุกรูปลูกเต๋าจึงมีความสำคัญอย่างมาก การแช่เยือกแข็งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นำมาใช้เพื่อให้เนื้ออกไก่ปรุงสุกยังคงมีคุณภาพดีทั้งด้านเคมีและกายภาพ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1 วัตถุดิบ

กล้ามเนื้อหน้าอก (pectoral muscle) เป็นกล้ามเนื้อที่ใหญ่ที่สุดของร่างกาย ใช้เคลื่อนไหวขยับปีกขึ้นลง ทำงานร่วมกับกล้ามเนื้อที่โคนปีกซึ่งใช้กางและหุบปีก กล้ามเนื้อหน้าอกจะมีความรู้สึกและควบคุมบังคับได้ตามความต้องการของสัตว์ซึ่งรับกระแสรับส่งผ่านมาจากระบบประสาทส่วนกลางจึงจัดเป็นกล้ามเนื้อใต้อำนาจจิตใจ (Voluntary Muscle)

เนื้อหน้าอกของอกไก่กระทง เป็นกล้ามเนื้อสีขาว (white muscle) หรืออาจเรียกว่า Light meat ก็ได้ เพราะมีไมโอโกลบิน (myoglobin) ต่ำประมาณ 0.4 มิลลิกรัมต่อกรัมของกล้ามเนื้อและมีปริมาณไขมันต่ำ (ลิขิต เอียดแก้ว, 2532)

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไก่กระทง (สุวรรณ เกษตรสุวรรณ, 2529)

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (%)
ความชื้น	74.80
โปรตีน	21.60
ไขมัน	2.50
เถ้า	1.10

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 การผลิตอกไก่กระทงสุกรูปลูกเต๋าแช่เยือกแข็ง

2.2.1 กระบวนการผลิตเพื่อให้ได้เนื้อหน้าอกไก่ (สุวรรณ เกษตรสุวรรณ, 2529)

เนื้อหน้าอกไก่ จะได้จากขั้นตอนการชำแหละชิ้นส่วนต่างๆของ ซึ่งมีขั้นตอนดังรูปที่ 1

รูปที่ 1 ขั้นตอนการชำแหละชิ้นส่วนต่างๆของไก่

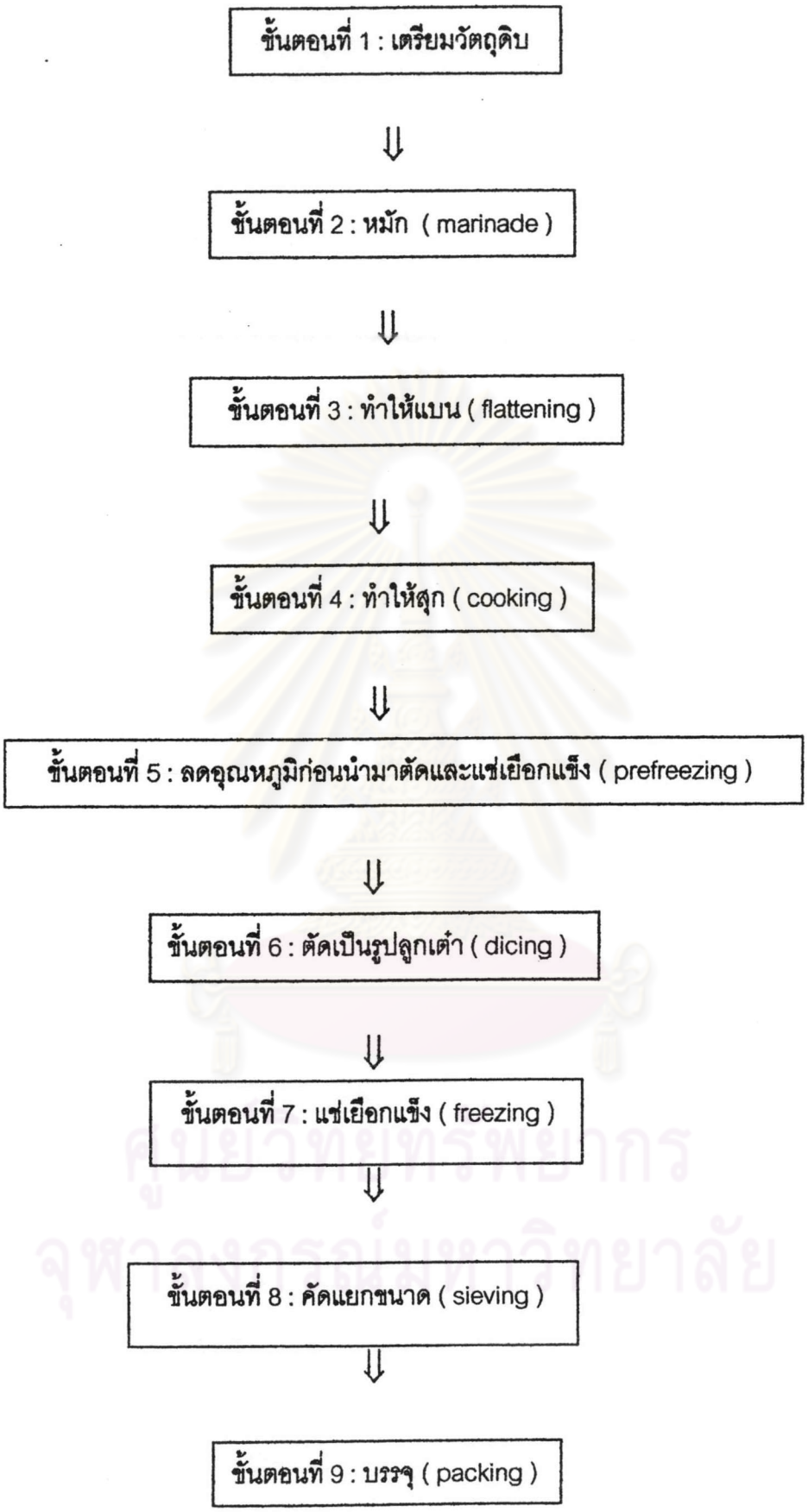
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อไก่กระทงถูกนำเข้ามายังโรงงานจะต้องตรวจสอบ ชื่อฟาร์ม จำนวนไก่ อายุ และสุ่มตรวจสารพิษตกค้าง จากนั้นจับไก่แขวนราว ห้อยหัวลง จุ่มหัวไก่ลงในน้ำที่มีกระแสไฟไหลผ่าน เพื่อให้ไก่หมดสติ จึงทำการเชือดคอ ผ่านขั้นตอนการถอนขนด้วยเครื่องถอนขน โดยก่อนถอนขนจะต้องนำไก่มาลวกน้ำร้อน น้ำที่ใช้ลวกไก่จะมีอุณหภูมิ 55 - 60°C เป็นเวลา 1 นาที ต่อมาชุบน้ำ ครึ่งนาที แล้วจึงถอนขน จะช่วยให้ถอนขนได้ง่ายขึ้น จากนั้น ตัดหัว ตัดเท้า ผ่าก้นและล้วงเครื่องใน ทำความสะอาด โดยพ่นน้ำเย็นผสมคลอรีน 500 ppm เพื่อลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ ไก่จะถูกบรรจุลงในถังน้ำเพื่อลดอุณหภูมิในตัวไก่ลงให้เหลือ 4°C จะใช้เวลาประมาณ 40 นาที ไก่จะมีผิวที่ชุ่มตึง มีลักษณะปรากฏที่ดี หลังจากนั้นไก่จะถูกนำมาแขวนบนราวอีกครั้ง โดยเอาหัวขึ้น และชำแหละส่วนต่างๆตามที่ตลาดต้องการ โดยทั่วไปจะชำแหละส่วนน่อง ปีก สันใน และอก

2.2.2 กระบวนการผลิตอกไก่รูปลูกเต๋าที่แช่เยือกแข็ง (Shaevel , 1993)

หลังจากผ่านการชำแหละชิ้นส่วน จะนำเนื้อหน้าอกไก่มาผ่านกระบวนแปรรูปเพื่อให้ได้เป็นอกไก่กระทงสุกรูปลูกเต๋า และจำหน่ายในรูปแช่เยือกแข็งต่อไป โดยมีขั้นตอนการผลิตดังรูปที่ 2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2 กระบวนการผลิตอกไก่กระทงสุกรูปลูกเต๋าที่แช่เยือกแข็ง

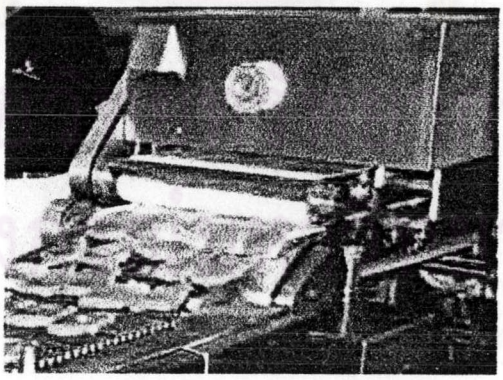
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขั้นตอนที่ 1 : เตรียมวัตถุดิบ นำเนื้อออกไก่มาตัดแต่งโดยดึงหนังออก ตัดอกซ้ายและขวาออกจากกัน และคัดขนาดตามเกณฑ์ที่กำหนด

ขั้นตอนที่ 2 : หมัก (marinade) มีจุดประสงค์เพื่อส่งต่อความชุ่มชื้นไปสู่เนื้อ เพิ่มรสชาติเข้าไปในเนื้อ หรือใช้กระตุ้นและส่งเสริมให้เส้นใยกล้ามเนื้อนุ่ม บวม (muscle fibre swelling) เพิ่มความสามารถในการดูดซับของเหลวเพื่อปรับปรุง % yield ของผลิตภัณฑ์ โดยสารที่ใช้อาจเป็นสารละลายเกลือ ตัวปรับค่า pH พวกสารเชื่อม (binder) และ อิมัลซิไฟเออร์(emulsifier) รวมทั้งเครื่องเทศต่างๆ

การหมักสามารถทำได้หลายวิธี เช่น multi-needle injection,tumbling and massaging, static immersion และการใช้หลายๆวิธีร่วมกัน ในโรงงานอุตสาหกรรมจะใช้วิธี vacuum tumbling ด้วยเครื่อง Vacuum Tumbler โดยส่วนของเครื่องจะมี vacuum pump ซึ่งจะดูดอากาศภายในถัง Vacuum Tumbler ทำให้ความดันภายในลดต่ำลง สภาพสุญญากาศมีมากขึ้น ทำให้เนื้อไก่สามารถที่จะรับปริมาณสารละลายที่ใส่เข้าไปไว้กับโครงสร้างมากขึ้น ในการหมักเพื่อให้ได้กำลังการผลิตที่สูง สามารถกำหนดความเร็วรอบและระยะเวลาที่ใช้ได้

ขั้นตอนที่ 3 : ทำให้แบน (flattening) เนื่องจากลักษณะเนื้ออกไก่มีส่วนที่หนาและบางทางส่วนบนและจะค่อยๆบางลงในส่วนปลาย ทำให้การให้ความร้อนเพื่อทำให้สุกในส่วนที่หนานานกว่าส่วนที่แบน จึงต้องใช้เครื่อง Flattener เพื่อทำให้เนื้ออกไก่มีความหนาใกล้เคียงกัน และใช้เวลาใกล้เคียงกันในการทำให้สุก



รูปที่ 3 เครื่องรีดเนื้อหน้าอกไก่ (Flattener)

ขั้นตอนที่ 4 : ทำให้สุก (cooking) เพื่อทำลายจุลินทรีย์ในเนื้อ ใช้ความร้อนระดับพาสเจอไรส์ (pasteurize) โดยจะนึ่งจนอุณหภูมิใจกลางของเนื้อสูงกว่า 70 - 75 ^{o}C

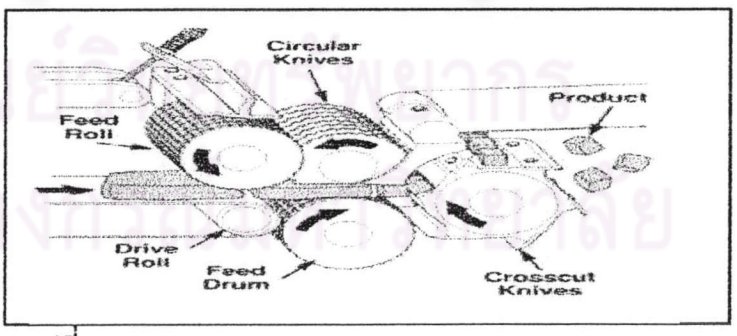
ในโรงงานอุตสาหกรรมนิยมนึ่งแบบ steam tunnel โดยให้ชิ้นเนื้อผ่านตามสายพานเข้าไปในอุโมงค์ ซึ่งด้านบนของอุโมงค์จะพ่นไอน้ำออกมาที่ชิ้นเนื้อ เมื่อชิ้นเนื้อผ่านไปจนถึงทางออกจะสุกและมีอุณหภูมิตามที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 5 : การลดอุณหภูมิก่อนแช่เยือกแข็ง (prefreezing) หลังจากผ่านขั้นตอนการทำให้สุกจะต้องทำให้ชิ้นเนื้อเย็นตัวลง เพราะเนื้อที่สุกใหม่ๆจะอ่อนแอและบอบบางอย่างมาก หากนำมาตัดจะทำให้เกิดการแยกของแต่ละเส้นใย การทำให้เนื้อเย็นจะทำให้เส้นใยกล้ามเนื้อหดตัวและแน่นซึ่งสามารถนำมาตัดได้

การทำให้ชิ้นเนื้อเย็นตัวอย่างรวดเร็ว โดยใช้เครื่องแช่เย็นที่มีการหมุนเวียนของลมเย็นจะช่วยปรับปรุงของผลิตภัณฑ์ในเรื่อง % yield ได้ดีกว่าเครื่องแช่เย็นที่ไม่มีการหมุนเวียนของลม

ขั้นตอนที่ 6 : ตัดเป็นรูปลูกเต๋า (dicing) ชิ้นเนื้อไก่ที่ผ่านการลดอุณหภูมิจนชิ้นเนื้อเริ่มแข็ง จะถูกนำเข้าสู่เครื่องตัดเพื่อทำให้ชิ้นเนื้อไก่มีรูปทรงลูกเต๋า (dicing machine) โดยตัวเครื่องจะเป็นใบมีดที่ทำการตัดชิ้นเนื้อตามแนวยาว (circular knives) และตัดด้วยใบมีดแนวขวาง (cross cut knives) อีกชุดหนึ่งเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปลูกเต๋าออกมา

ชิ้นเนื้อไก่ที่ต้มสุกและผ่านการลดอุณหภูมิแล้วจะลำเลียงผ่านตามสายพานปลอดเชื้อ (sanitation belt) มายังเครื่องตัด ใบมีดจะตัดผ่านเนื้อเยื่อและแยกชิ้นเนื้อไก่ออกเป็นชิ้นลูกเต๋าเล็กๆแต่ละชิ้นโดยขนาดของลูกเต๋าขึ้นกับขนาดของใบมีดและพื้นที่ผิวที่ต้องการ



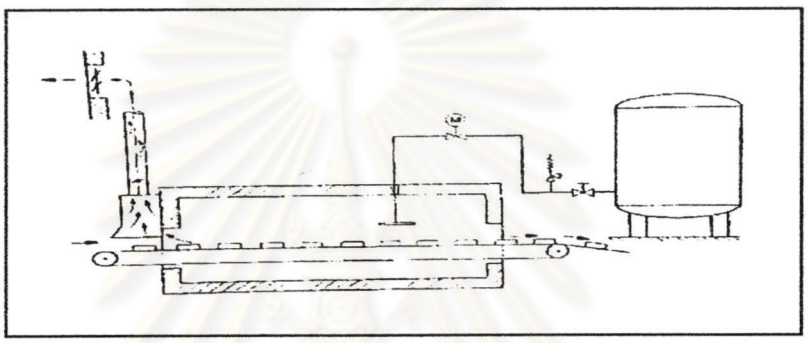
รูปที่ 4 Dice machine (www . urschell.com)

ข้อควรระวังในขั้นตอนการตัดนอกจากต้องดูแลความคมของใบมีดแล้ว ยังต้องควบคุมอุณหภูมิของชิ้นเนื้อไก่ก่อนนำมาตัดด้วย ชิ้นเนื้อไก่ที่เย็นเกินไปจะมีแนวโน้มที่จะเกิดเป็นรอนหยักและแตกหักขณะตัดได้ แต่ถ้าชิ้นเนื้อที่นำมาตัดมีอุณหภูมิสูงเกินไปก็จะเกิดการแยกบริเวณ

ส่วนเชื่อมต่อใยกล้ามเนื้อ จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่พอเหมาะของชิ้นเนื้อที่จะนำมาตัดอยู่ที่ -4°C ถึง -1°C

ขั้นตอนที่ 7 : แช่เยือกแข็ง (freezing) ชิ้นเนื้อไก่ที่ผ่านการตัดเป็นรูปลูกเต๋าแล้ว จะถูกนำมาผ่านขั้นตอนการแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิกแบบอุโมงค์ (Cryogenic tunnel freezing) ใช้สารให้ความเย็น คือไนโตรเจนเหลว (Liquid Nitrogen)

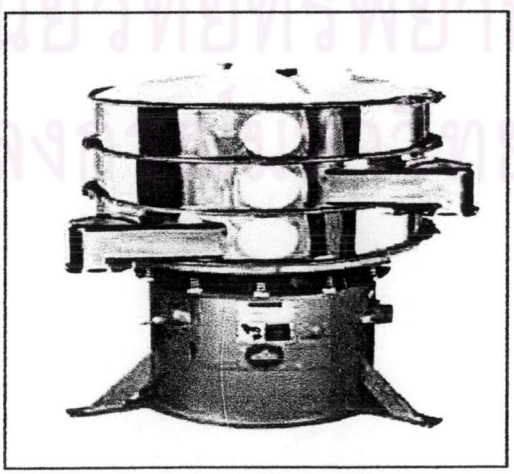
ภายในอุโมงค์จะมีสายพานเป็นตัวนำผลิตภัณฑ์เข้าไปแช่เยือกแข็ง การเคลื่อนที่ของอาหารจะมีทิศทางสวนกับทิศทางของไอไนโตรเจนที่เกิดขึ้น



รูปที่ 5 : Cryogenic tunnel Freezer (Person and Londahl , 1993)

ขั้นตอนที่ 8 : คัดแยกขนาด (sieving)

เนื้อไก่รูปลูกเต๋าที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง จะผ่านตะแกรงร่อนเพื่อคัดเลือกเฉพาะเนื้อไก่รูปลูกเต๋าที่มีขนาดตามที่กำหนด ซึ่งเนื้อไก่รูปลูกเต๋าที่ถูกร่อนแยกออกมานั้น บางส่วนเกิดจากขั้นตอนการตัดที่ไม่ได้ขนาดตามเกณฑ์ที่กำหนด และบางส่วนซึ่งแตกหักเป็นเศษเล็กๆ เนื่องมาจากการเกิดรอยร้าวของเนื้อไก่รูปลูกเต๋าหลังจากผ่านการแช่เยือกแข็ง



รูปที่ 6 Seiving machine (www. Sweco.com)

ขั้นตอนที่ 9 : บรรจุ (packing) เนื้อไก่รูปลูกเต๋าที่ผ่านขั้นตอนการคัดแยกขนาดจะถูกนำมาบรรจุตามน้ำหนักที่กำหนด และเก็บที่อุณหภูมิ -25^{0} C เพื่อรอการขนส่ง

2.2.3 วัตถุเจือปนที่ต้องใช้ในขั้นตอนการหมัก

2.2.3.1 สารประกอบฟอสเฟต (phosphate compound) ในวงการอาหารประเภทเนื้อสัตว์แปรรูป แช่เยือกแข็ง ได้มีการนำสารประกอบฟอสเฟตมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ในสหรัฐอเมริกา สารพอลิฟอสเฟต (polyphosphate) ได้รับการรับรองให้เป็นสารประกอบของอาหารที่ปลอดภัย (GRAS : Generally Recognized as Safe) สารประกอบที่นิยมใช้เป็นสารจำพวกพอลิฟอสเฟต (polyphosphate) มีหลายชนิด เช่น โซเดียมแอซิดไพโรฟอสเฟต(Sodium acidpyrophosphate : SAPP),โซเดียมไตรพอลิฟอสเฟต (Sodium tripolyphosphate : STPP) (Prasad and Katre,1997)

สารประกอบฟอสเฟตที่ใช้ในเนื้อสัตว์จะมีผลต่อโปรตีนในกล้ามเนื้อ โดยจะสกัดไมโอซิน (myosin) และไมโอซินที่สกัดออกมาจับกับน้ำได้ดี ซึ่งช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีความสามารถในการอุ้มน้ำเพิ่มขึ้น และช่วยรักษาโปรตีนชนิดละลายน้ำ เกลือแร่และวิตามินในผลิตภัณฑ์อีกด้วย นอกจากนี้สารประกอบฟอสเฟตยังมีผลช่วยในการถนอมอาหารให้เก็บได้นานขึ้น โดยการจับกับโลหะพวกแมกนีเซียมและแคลเซียมซึ่งจำเป็นต่อการเจริญของจุลินทรีย์ จึงป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ได้ (Deman and Melnychyn , 1971)

เหตุผลหลักของการเติมสารประกอบฟอสเฟตในผลิตภัณฑ์เนื้อหมัก (cured meat) และเนื้อทั้งชิ้นแช่เยือกแข็งเพื่อควบคุมการสูญเสียน้ำจากผลิตภัณฑ์ ซึ่งเกิดจากการชำแหละ สารประกอบฟอสเฟตจะช่วยเพิ่มสมบัติการจับน้ำไว้ในเนื้อ ซึ่งเกิดจากการที่ค่า pH และค่า strength สูง (Dziezak ,1990

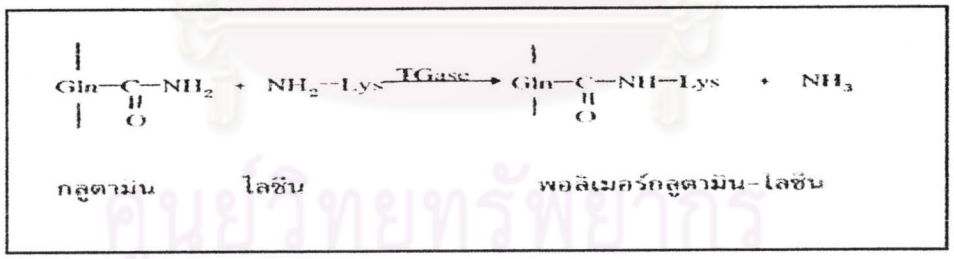
Panda และคณะ (1995) ศึกษาผลของ STPP ที่มีต่อนกกระทา (quail) ทอดซึ่งเก็บโดยการแช่เย็นเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ พบว่า ตัวอย่างนกกระทาที่ผ่านการแช่ STPP ความเข้มข้น 5 % ก่อนนำมาทอด จะมี weight loss ต่ำกว่า และมีคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสสูงกว่าตัวอย่างนกกระทาที่ไม่ผ่านการแช่ STPP

การเติมฟอสเฟต อาจทำให้ผู้บริโภคถูกเอาเปรียบจากน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจากการที่สารประกอบฟอสเฟตสามารถกักเก็บไว้ในอาหารได้เพิ่มขึ้น จึงได้มีข้อกำหนดปริมาณการใช้ โดยโซเดียมแอซิดไพโรฟอสเฟต และโซเดียมพอลิฟอสเฟต ปริมาณสูงสุดที่ยอมให้ใช่ในอาหารได้คือ ไม่เกิน 5 กรัมต่อกิโลกรัม หรือ 0.5 %ในรูปของ P_2O_5(Richard, 1989)

USDA (1998) ได้กำหนดให้ผลิตภัณฑ์ไก่แปรรูปที่มีน้ำหนักต่ำกว่า 4.5 ปอนด์ สามารถดูดน้ำได้ไม่เกิน 8 % และผลิตภัณฑ์ไก่แปรรูปที่มีน้ำหนักมากกว่า 4.5 ปอนด์ สามารถดูดซับน้ำได้ไม่เกิน 6 %

2.2.3.2 เอนไซม์ทรานซ์กลูตามิเนส (Tranglutaminase , TGase)

เอนไซม์ทรานซ์กลูตามิเนส มีชื่อตามระบบว่า Protein – glutamine - γ - glutamyl transferase และชื่อตามรหัสคือ E.C. 2.3.2.13 เป็นเอนไซม์ที่พบในสัตว์หลายชนิด เช่น ปลา หอยนางรม หมู และยังพบในจุลินทรีย์บางสายพันธ์ เช่น *Streptoverticillium mobarense Bacillus subtilis* และ *Streptoverticillium* sp. (Motoki และ Kumazawa , 2000) ปฏิกิริยาของเอนไซม์ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้ คือ ปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง (crosslinking) ระหว่างอนุมูลกลูตามีนและอนุมูลของไลซีน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะได้ผลิตผลเป็นโปรตีนสายยาวสายใหม่เชื่อมระหว่างอนุมูลกลูตามีนและไลซีน (ปราณี อ่านเปรื่อง,2533)



รูปที่ 7 ปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง ระหว่างอนุมูลกลูตามีนและอนุมูลของไลซีน
(ปราณี อ่านเปรื่อง,2533)

การประยุกต์ใช้เอนไซม์ทรานซ์กลูตามิเนสในอาหารโปรตีนจำพวกเนื้อสัตว์ เอนไซม์จะปรับปรุงโครงสร้างของเนื้อขึ้นมาใหม่ เช่นในเนื้อชิ้นเล็กๆ หรือในเนื้อบด โดยสร้างพันธะโควาเลนซ์ขึ้นมา จะทำให้เกิดเจลขึ้นและเชื่อมเนื้อให้ติดกันที่อุณหภูมิต่ำกว่า 10°C

นาน 1 คืน เนื้อที่ได้สามารถนำมาแผ่เป็นแผ่น และแข็งแรงพอที่จะทนต่อการนำไปผ่านความร้อน และแรงทางกายภาพ (Motoki และ Kumazawa , 2000)

Motoki และ Seguro (1998) ได้พัฒนาระบบการเชื่อมชิ้นเนื้อที่มีองค์ประกอบของโปรตีนประเภทไมโอซินไม่เพียงพอหรือมีโปรตีนคุณภาพต่ำโดยใช้เอนไซม์ทรานกลูตามิเนส ร่วมกับ เคซีนเนต (caseinate) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้น และถูกเร่งปฏิกิริยาโดยเอนไซม์ ทำให้เกิดความหนืดและเจลเชื่อมโครงสร้างชิ้นเนื้อเข้าด้วยกันใหม่ ซึ่งทำให้เนื้อมีลักษณะเหมือนธรรมชาติโดยไม่ต้องใช้สารช่วยอุ้มน้ำซึ่งปกติจะใช้เกลือฟอสเฟต จึงนิยมใช้เอนไซม์นี้ในผลิตภัณฑ์เนื้อ, สเต็กหมู ไส้กรอก และซูริมิ เกิดเป็นผลิตภัณฑ์แบบปลอดสารเคมีขึ้นได้มาก

2.3 การแช่เยือกแข็ง

การแช่เยือกแข็งอาหารเป็นวิธีการถนอมอาหารที่นิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากวิธีนี้สามารถรักษากลิ่น รส สี และคุณค่าทางอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การแช่เยือกแข็งประกอบด้วยการลดอุณหภูมิซึ่งโดยทั่วไปจะลดลงถึง –18 °C หรือต่ำกว่า และการเกิดผลึกน้ำแข็งภายในผลิตภัณฑ์ โดยที่การเกิดผลึกน้ำแข็งของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดเกิดขึ้นหลังจากเกิดจุดเย็นตัวยิ่งยวด (super-cooling)ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่อุณหภูมิของสารละลายลดลงต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง โดยปราศจากผลึกน้ำแข็ง จากนั้นอุณหภูมิในผลิตภัณฑ์จะสูงขึ้นเนื่องจากสารละลายที่จุดเย็นตัวยิ่งยวดจะคายความร้อนออกมาและน้ำจะเปลี่ยนเป็นผลึกน้ำแข็งที่จุดนี้ ซึ่งคือจุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์นั้นเอง (IIR,1972) การเกิดผลึกจะเริ่มที่ของเหลวภายนอกเซลก่อน เมื่อการเกิดผลึกภายนอกเซลเริ่มขึ้นอาจจะเกิดการเกิดผลึกต่อเนื่องที่บริเวณภายนอกเซลต่อไปในระหว่างที่มีการลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่ หรืออาจเกิดการเกิดผลึกบริเวณภายในเซลขึ้นซึ่งจะเกิดเมื่อมีการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว (ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาสิก, 2532) ซึ่งการแช่เยือกแข็งที่มีการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วจะเกิดผลึกน้ำแข็งในปริมาณมาก จึงทำให้ผลึกโตในขนาดที่จำกัด กระจายอยู่ทั่วไปทั้งภายในและภายนอกเซล (Fellows,1990)

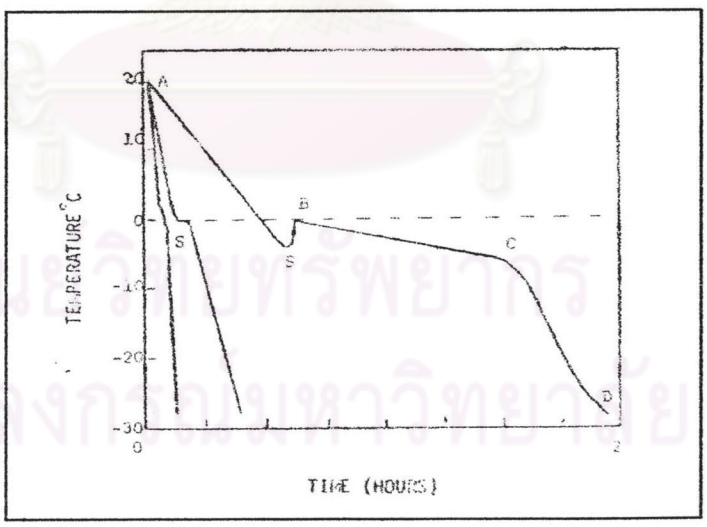
ผลิตภัณฑ์อาหารเมื่ออยู่ในสภาพแช่แข็งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร คือ ปริมาตรจะเพิ่มขึ้น แต่จะน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในน้ำบริสุทธิ์ น้ำบริสุทธิ์เมื่อเปลี่ยนไปเป็นผลึกน้ำแข็งปริมาตรจะเพิ่มขึ้น 9% ในผลิตภัณฑ์อาหารปริมาตรจะเพิ่มขึ้นประมาณ 6% ทั้งนี้เพราะ

ว่ามีน้ำเพียงบางส่วนในผลิตภัณฑ์เท่านั้นที่เปลี่ยนเป็นน้ำแข็งและในขณะเดียวกันก็มีช่องว่างอากาศอยู่ภายในอาหารอีกด้วย (IIR, 1972)

การนำความร้อนของผลิตภัณฑ์อาหารจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาขณะแช่แข็ง โดยขึ้นกับการจัดเรียงตัวของโครงสร้างในเนื้อเยื่อของผลิตภัณฑ์ , อุณหภูมิซึ่งจึงมีผลต่ออัตราเร็วของการแช่แข็ง (Fennema , Powrie and Marth ,1973) นอกจากนี้ในขณะแช่แข็งถ้าผลิตภัณฑ์ไม่ได้บรรจุอยู่ในภาชนะจะทำให้เกิดการสูญเสียความชื้นประมาณ 0.5-1.5% หรือมากกว่านี้ขึ้นกับอุณหภูมิขณะแช่แข็ง อัตราเร็วที่ใช้ในการแช่แข็ง และชนิดของผลิตภัณฑ์ที่นำมาแช่แข็ง โดยผลิตภัณฑ์จะสูญเสียความชื้นไปเนื่องจากการระเหย (IIR, 1972)

2.3.1 จุดเยือกแข็ง (Freezing point)

จุดเยือกแข็ง เป็นอุณหภูมิที่เกิดการสร้างผลึกน้ำแข็งขณะแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์อาหารหรืออุณหภูมิที่ผลึกน้ำแข็งสุดท้ายเกิดการหลอมละลายขณะละลายอาหาร ซึ่งการหาจุดเยือกแข็งของอาหาร สามารถทำได้โดยวิธีพิจารณากราฟการแช่เยือกแข็งอาหาร (freezing curve method) โดยกราฟจะแสดงรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์อาหารในสภาวะแช่เยือกแข็ง (Fennema , et.al.,1973)



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในขณะแช่เยือกแข็ง

จากจุด A - S เป็นช่วงที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เย็นตัวลงเป็นการระบายความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์ และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากน้ำไปเป็นผลึกน้ำแข็ง จุด S เป็นจุดเย็นตัวยิ่ง

ยวด (supercooling) คือจุดที่สารละลายภายในผลิตภัณฑ์อาหารมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง แต่ไม่เกิดผลึกน้ำแข็งซึ่งจุดนี้ไม่จำเป็นต้องพบเสมอไป หลังจากจุดเย็นตัวยิ่งยวดผ่านไปเล็กน้อย จะเกิดความร้อนของการเกิดผลึกน้ำแข็ง (heat of crystallization) ซึ่งทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์อาหารสูงขึ้นและเริ่มเกิดผลึกน้ำแข็ง (IIR ,1972 ; Fennema , et.al.,1973)

Rahman และ Driscoll (1994) พิจารณาว่า จุด B เป็นจุดเยือกแข็งซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีการกำจัดความร้อนแฝง (latent heat) ออกไปมากที่สุด ค่าจุดเยือกแข็งขึ้นกับวิธีวัด ชนิดอาหาร องค์ประกอบในอาหารและความสด

อุณหภูมิของอาหารจะค่อยๆลดลงในช่วง B - C น้ำจะแยกตัวออกเป็นผลึกน้ำแข็ง การเกิดผลึกน้ำแข็งในอาหารจะทำให้ส่วนของของแข็งที่ละลายน้ำมีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น จุด C เป็นจุดที่ปริมาณน้ำสามารถเปลี่ยนไปเป็นผลึกน้ำแข็งได้น้อยกว่าจุดเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์อาหาร และเป็นจุดเยือกแข็งของของแข็งที่ละลายน้ำ เรียกว่าจุดยูเทคติก (eutectic) ของตัวถูกละลาย อุณหภูมิของอาหารจะมีอุณหภูมิลดลงจนถึงจุด D ซึ่งเป็นอุณหภูมิสุดท้ายที่ต้องการหลังแช่เยือกแข็งและจุดนี้ยังคงเหลือปริมาณน้ำที่ไม่สามารถเปลี่ยนเป็นผลึกน้ำแข็งได้ (IIR ,1972 ; Fennema , et.al.,1973)

2.3.2 อัตราเร็วของการแช่เยือกแข็ง (Freezing rate)

อัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งของผลิตภัณฑ์อาหาร คือ อัตราส่วนของความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายกับเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็ง มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียสต่อเวลา (ธนกร โรจนกร , 2538) หลักการที่ใช้กำหนดอัตราการแช่เยือกแข็งมีหลายวิธี เช่น กำหนดจากเวลาที่ผ่านไปในช่วงที่ผลิตภัณฑ์แข็งตัว ถ้าระยะเวลาในช่วงที่ผลิตภัณฑ์แข็งตัวซึ่งเป็นช่วงที่ความชันของกราฟระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาที่เยือกแข็งเป็นเส้นตรงมีระยะเวลา 1 – 2 นาทีจัดเป็นการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (Fennema , et.al.,1973) นอกจากนี้อัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งอาจคำนวณจาก อัตราการเคลื่อนที่ของผลึกน้ำแข็งจากผิวหน้าไปยังจุดกึ่งกลางผลิตภัณฑ์ โดยระยะเวลาที่ใช้จะเริ่มตั้งแต่อุณหภูมิที่ผิวของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 0°C จนถึงอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางผลิตภัณฑ์ต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง -10°C โดยอัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งที่น้อยกว่า 0.2 เซนติเมตรต่อชั่วโมง จัดเป็นการเยือกแข็งแบบช้า (slow freezing , sharp freezing) อัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งระหว่าง 0.5 – 3.0 เซนติเมตรต่อชั่วโมง จัดเป็นการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว(quick freezing) อัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งระหว่าง 5.0 – 10.0

เซนติเมตรต่อชั่วโมง จัดเป็นการเยือกแข็งแบบเร็วมาก (rapid freezing) และอัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งระหว่าง 10.0 – 100.0 เซนติเมตรต่อชั่วโมง จัดเป็นการเยือกแข็งแบบเร็วยิ่งยวด (ultra rapid freezing)(Pan and Yeh , 1993)

2.3.3 วิธีการแช่เยือกแข็ง (Method of freezing)

ปัจจุบันวิธีการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์อาหารมีอยู่หลายวิธี แต่ละวิธีจะมีอัตราเร็วของการแช่เยือกแข็ง (freezing rate) แตกต่างกันออกไปอีกด้วย วิธีแช่เยือกแข็งที่นิยมใช้มีดังนี้ (Fennema,et.al.,1973 ; Brennan , et.al.,1976 ; Sebranek,1982)

2.3.3.1. วิธีการแช่เยือกแข็งด้วยลมเย็น (Air freezing)

วิธีการแช่เยือกแข็งด้วยลมเย็น สามารถแบ่งเป็นแบบต่างๆ ได้ 3 แบบ คือ แบบ still air freezing เป็นวิธีแช่เยือกแข็งโดยอาศัยลมเย็นอุณหภูมิต่ำ มีการหมุนเวียนอย่างช้าๆ หรือไม่มีการหมุนเวียนของลมเย็นเลย แบบที่สองคือ air blast freezing เป็นวิธีแช่เยือกแข็งโดยอาศัยลมเย็นเป็นตัวกลางเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง หมุนเวียนอยู่เหนือผลิตภัณฑ์ อัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งจะขึ้นกับความเร็วลม , อุณหภูมิลมเย็น และอุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ และแบบ fluidized-bed freezing เป็นวิธีแช่เยือกแข็งที่ใช้ลมเย็นอุณหภูมิต่ำ ความเร็วสูง สัมผัสกับอาหารซึ่งต้องเป็นของแข็งและมีขนาดเล็ก รูปร่างสม่ำเสมอ หลักการของวิธีแช่เยือกแข็งนี้คือทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารลอยตัวด้วยลมเย็นที่เป่าจากด้านล่างขึ้นไปด้านบน โดยผ่านชั้นของตะแกรงสำหรับวางผลิตภัณฑ์

2.3.3.2 วิธีการแช่เยือกแข็งด้วยแผ่นโลหะเย็น (Plate freezing)

ผลิตภัณฑ์อาหารที่นำมาแช่เยือกแข็งจะถูกจัดวางไว้ระหว่างแผ่นโลหะเย็น ซึ่งผลิตภัณฑ์จะถูกสัมผัสทั้ง 2 ด้าน โดยแผ่นโลหะเย็นซึ่งภายในมีสารทำความเย็นไหลอยู่ วิธีนี้การถ่ายเทความร้อนเป็นไปได้ดีมาก ข้อจำกัดของการเลือกใช้วิธีนี้ คือ ผลิตภัณฑ์จะต้องมีขนาดและรูปร่างสม่ำเสมอก่อนนำเข้าไปแช่เยือกแข็ง ระยะเวลาในการแช่เยือกแข็งจะขึ้นอยู่กับขนาดของผลิตภัณฑ์ ถ้าหนามากก็จะใช้เวลามาก

2.3.3.3 วิธีการแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิก (Cryogenic freezing)

เป็นวิธีการแช่เยือกแข็งที่ใช้อุณหภูมิในการแช่เยือกแข็งต่ำมาก โดยทั่วไปต่ำกว่า –60 °C จึงทำให้มีอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งสูง วิธีการคือนำเอาผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแช่เยือกแข็ง อาจบรรจุในภาชนะที่เป็นวัสดุชนิดแผ่นฟิล์มบางหรือไม่บรรจุภาชนะก็ได้ นำมาสัมผัสกับสารที่ให้ความเย็น (cryogen) ซึ่งสารเหล่านี้จะมีจุดเดือดต่ำมาก เช่น ไนโตรเจนเหลว มีจุดเดือด (boiling point) –196 °C , คาร์บอนไดออกไซด์เหลวมีจุดเดือด –78 °C และจะดึงความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์เพื่อไปใช้ในการเปลี่ยนสถานะ

2.3.4 วิธีการแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิกด้วยไนโตรเจนเหลว

ไนโตรเจนเป็นกาซที่มีความเฉื่อยสูง ผลิตได้จากการแยกกาซจากบรรยากาศ เนื่องจากไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบหลัก 78 % เมื่อเทียบกับการใช้กาซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยไนโตรเจนจะมีความสามารถในการนำความร้อนออกจากอาหารได้มากกว่า และมีความปลอดภัยในการใช้มากกว่า (Heber, et.al.,1991)

Hung and Kim (1996) ได้แบ่งประเภทของการแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิกด้วยไนโตรเจนเหลว เป็น 3 แบบ คือ การจุ่มในไนโตรเจนเหลว เป็นวิธีการแรกสุดที่เริ่มมีการใช้การแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิก โดยการจุ่มผลิตภัณฑ์ลงในไนโตรเจนเหลว ลักษณะของเครื่องแช่เยือกแข็งเป็นอ่างไนโตรเจนเหลวที่ทำด้วยโลหะไร้สนิม ภายใต้ไนโตรเจนเหลวมีสายพานนำผลิตภัณฑ์ผ่านเข้าและออกจากอ่างไนโตรเจน แบบที่สองเป็นการฉีดพ่นด้วยไนโตรเจนเหลว ไนโตรเจนเหลวจะถูกฉีดพ่นไปที่ผลิตภัณฑ์ แล้วเกิดการเปลี่ยนสถานะของไนโตรเจนเหลวกลายเป็นไอ และแบบสุดท้าย เป็นการพัดหมุนเวียนของไอไนโตรเจน ไนโตรเจนเหลวถูกทำให้กลายเป็นไอ ไอของไนโตรเจนจะพัดผ่านหมุนเวียนด้วยความเร็วสูงอยู่เหนือผลิตภัณฑ์อาหารแล้วนำความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์อาหาร

ข้อดีของการใช้ไนโตรเจนเหลวก็คือ ใช้เวลาในการแช่เยือกแข็งน้อย มีการสูญเสียความชื้นน้อยกว่า 1% และมีการสูญเสียน้ำเพียงเล็กน้อยในระหว่างการละลายอีกด้วย Sebranek และคณะ (1978) ศึกษาถึงคุณลักษณะของเนื้อบดก้อน (ground beef patties) ที่

แช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิก โดยใช้ไนโตรเจนเหลว ที่อุณหภูมิ -74 °C และที่แช่เยือกแข็งโดยใช้ลมเป่าที่อุณหภูมิ -29°C พบว่าการสูญเสียน้ำหลังจากการแช่เยือกแข็ง (% freezing loss) และการสูญเสียน้ำภายหลังการทำให้สุก (% cooking loss) ของเนื้อบดที่ผ่านการแช่เยือกแข็งโดยใช้ลมเป่า มีค่าสูงกว่าเนื้อบดที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิกด้วยไนโตรเจนเหลว ส่วนการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นรส เนื้อสัมผัสและการชุ่มน้ำ พบว่า การแช่เยือกแข็งแบบลมเป่ามีคะแนนต่ำกว่าการแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิกด้วยไนโตรเจนเหลว อย่างไรก็ตามการแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิกด้วยไนโตรเจนเหลวอาจส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากเป็นการแช่เยือกแข็งที่มีอัตรเร็วของการแช่เยือกแข็งสูงมาก จะทำให้เกิดความดันภายในเซลสูงมากและเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอย่างรวดเร็ว ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดรอยร้าว แตกและเสียหายได้

2.4 การเกิดรอยร้าวเนื่องจากการแช่เยือกแข็ง

แม้ว่าการแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิก ซึ่งมีอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งสูง จะมีผลทำให้ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างเนื้อเยื่อของผลิตภัณฑ์อาหารน้อยกว่า การสูญเสียน้ำน้อยกว่า และใช้เวลาน้อยกว่าการแช่เยือกแข็งวิธีอื่นๆ แต่การแช่เยือกแข็งที่มีอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งสูงในบางครั้งเป็นสาเหตุทำให้เกิดรอยร้าวหรือรอยแยกที่เกิดมาจากภายในผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Hung and Kim, 1996)

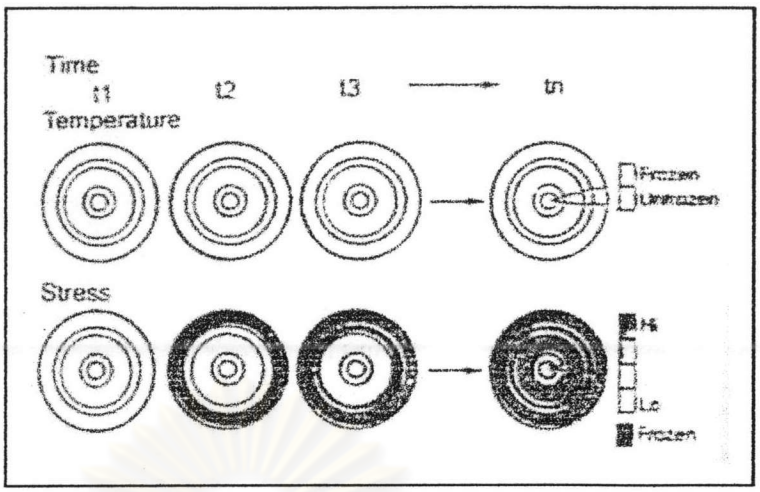
การเกิดรอยร้าวจากการแช่เยือกแข็ง (freezing-cracking) ที่พบมีอยู่ 2 แบบ (Hung, 1997) คือ รอยร้าวที่ผิวของผลิตภัณฑ์ จะเกิดเป็นรอยร้าวเล็กๆจำนวนมากกระจายอยู่ทั่วไปที่ผิวของผลิตภัณฑ์ พบในผลิตภัณฑ์ที่มีพื้นผิวขรุขระ ไม่เรียบ เช่น frozen cakes , frozen beef patties ซึ่งรอยที่เกิดขึ้นนี้ไม่มีผลต่อการยอมรับในตัวของผลิตภัณฑ์ และรอยร้าวที่กำเนิดมาจากภายในของผลิตภัณฑ์ จะเป็นรอยร้าวที่มีขนาดใหญ่ มีจำนวนน้อย และเกิดจากภายในสู่ภายนอกผลิตภัณฑ์ ซึ่งรอยร้าวที่เกิดขึ้นนี้จะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในด้านลักษณะปรากฏและมีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค

2.4.1 กลไกของการเกิดรอยร้าวจากการแช่เยือกแข็ง

กลไกที่นิยมใช้อธิบายถึงความเสียหายเนื่องจากการแช่แข็งแบบไครโอจินิกซึ่ง เป็นการแช่เยือกแข็งที่มีอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งสูงมาก คือ การที่ปริมาตรเพิ่มขึ้นซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสภาวะของของน้ำ การขยายตัวของปริมาตร และจำนวนของที่ว่างในโครงสร้างของอาหาร ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างการแช่เยือกแข็งในน้ำบริสุทธิ์ที่ 0 °C จะขยายตัว 9% เมื่อเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งที่อุณหภูมิเดียวกัน สำหรับน้ำในผลิตภัณฑ์อาหารจะเกิดการขยายตัวเช่นเดียวกัน แต่จะน้อยกว่าน้ำบริสุทธิ์ อาหารแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันในระดับความไวในการเกิดรอยร้าว อาจเนื่องมาจากความแตกต่างกันในเรื่องของปริมาณความชื้น ส่วนประกอบของอาหาร และจำนวนของ bound water(Hung, 1997)

Sebox , Csepregi และ Baar (1994) กล่าวว่าการแช่แข็งแบบเร็วจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดเปลือก (crust) ขึ้นที่ผิวของอาหารและยังเป็นสาเหตุในการสร้างความเค้น (stress) ให้เกิดขึ้นในอาหารอีกด้วย โดยความเค้นภายใน (internal stress) ที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากการขยายตัวของน้ำในอาหารขณะก่อรูปเป็นน้ำแข็ง (ice formation) และขณะขยายขนาดหลังจากเกิดเป็นผลึกแล้ว (crystal expansion)

Hung และ Kim (1996) กล่าวถึงกลไกของการเกิดรอยร้าวจากการแช่เยือกแข็งเนื่องมาจากการแช่เยือกแข็งแบบเร็วผิวหน้าของอาหารจะแข็งตัวก่อน เป็นสาเหตุของการสร้างเปลือกแข็ง (crust) ที่ผิวผลิตภัณฑ์ โดยเปลือกที่เกิดขึ้นจะไปปิดกั้นปริมาตรที่จะขยายเพิ่มขึ้นเมื่อภายในส่วนของ unfrozen material ในอาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ ซึ่งกระบวนการที่เกิดเปลือกแข็งขึ้นนี้เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการแช่เยือกแข็งซึ่งนับตั้งแต่น้ำในอาหารเริ่มเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง จึงมีส่วนช่วยในการสนับสนุนการสร้างความเค้นภายใน เมื่อใดที่ความเค้นภายในมีค่ามากกว่าความแข็ง (strength) ของ frozen material ที่เวลาใดๆก็ตามขณะแช่เยือกแข็งจะปรากฏรอยร้าวขึ้น



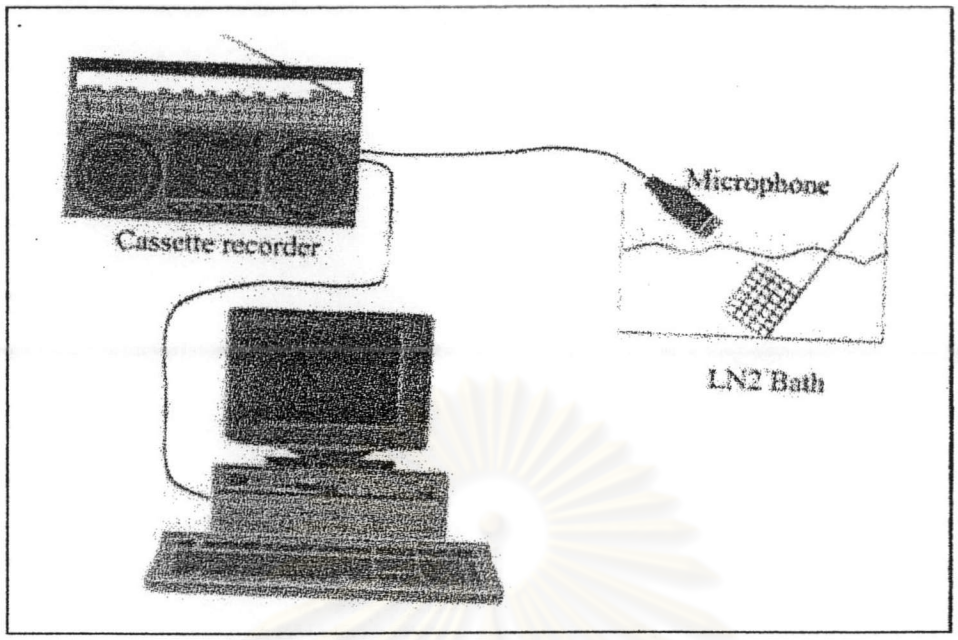
รูปที่ 9 Development of freeze-cracking during fast freezing
(Hung และ Kim ,1996)

ค่าความแข็ง (strength) ของผลิตภัณฑ์สามารถแสดงได้จากค่าอิรัสติกมอดูลัส (Modulus of elasticity) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่มีค่าอิรัสติกมอดูลัสสูงจะแข็ง และสามารถสร้างความเค้นภายในได้มากกว่าในผลิตภัณฑ์ที่มีค่าอิรัสติกมอดูลัสต่ำกว่า (Kim and Hung, 1994)

2.4.2 การตรวจสอบรอยร้าวที่เกิดขึ้น

การตรวจสอบการแตกร้าวของอาหารเมื่อผ่านการแช่เยือกแข็งสามารถตรวจได้โดยการใช้ประสาทสัมผัสต่างๆ เช่น การสังเกตด้วยสายตา (visual observation) การได้ยิน (human hearing) เป็นต้น (Hung, 1997)

McCambridge และคณะ (1996) ทำการทดลองโดยใช้คลื่นเสียงในการตรวจสอบรอยร้าวของอาหาร 4 ชนิด ได้แก่ mozzarella cheese , turkey ham , cheesecake และ magarine ขนาด 1.5 × 1 × 1 นิ้ว โดยใช้อุปกรณ์ ดังรูปที่ 10 เสียงที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่านมาที่ไมโครโฟน ซึ่งอยู่ห่างจากผิวของ Liquid nitrogen 25 เซนติเมตร และบันทึกไว้ด้วยเทป แล้วถูกเปลี่ยนเป็นตัวเลขและสัญญาณคลื่นเสียงโดยใช้ software



รูปที่ 10 แสดงการตรวจสอบรอยร้าวด้วยคลื่นเสียง

ตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง จะพบรอยร้าวในลักษณะต่างๆกันไป ใน mozzarella และ margarine จะพบรอยร้าวที่มีลักษณะคล้ายเส้นผม(hairline surface crack) ใน turkey ham พบรอยร้าวที่เป็นร่องขนาดใหญ่ (large gap) ส่วน cheese cake ไม่พบรอยร้าว เมื่อนำ mozzarella มาวิเคราะห์ความถี่ของคลื่นเสียงที่เกิดขึ้นขณะแช่เยือกแข็ง พบว่ามีลักษณะในการกระจายของความถี่ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดรอยร้าว โดยเสียงที่มีความถี่ต่ำกว่า 3,500 Hz จะไม่เกิดรอยร้าว เสียงที่มีความถี่ระหว่าง 3,500 — 7,000 Hz จะเกิดรอยร้าวขนาดเล็ก และเสียงที่มีความถี่มากกว่า 9,100 Hz จะเกิดรอยร้าวขนาดใหญ่ สามารถสังเกตได้ง่าย

2.4.3 การป้องกันการเกิดรอยร้าว (Prevention of freeze — cracking)

การป้องกันการเกิดรอยร้าวจากการแช่เยือกแข็ง โดยการควบคุมขั้นตอนการผลิตของผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็ง สามารถทำได้หลายวิธี (Hung, 1997 ; Hung และ Kim, 1996)

2.4.3.1. การลดอุณหภูมิก่อนนำผลิตภัณฑ์มาแช่เยือกแข็ง จะเป็นการลดเวลาที่ล่าช้าในระหว่างการแช่เยือกแข็งของผิวและใจกลางของผลิตภัณฑ์ ทำให้การขยายตัวบริเวณใจกลางของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการเปลี่ยนสถานะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ถ้าการเปลี่ยน

สถานะบริเวณใจกลางสามารถเกิดขึ้นก่อนที่ผิวของผลิตภัณฑ์จะแข็งตัวอย่างสมบูรณ์แล้ว ผลิตภัณฑ์อาหารจะสามารถทนต่อความเค้นภายในซึ่งเกิดขึ้นน้อยลงด้วยเนื่องจากบริเวณผิวยังแข็งตัวไม่สมบรูณ์

2.4.3.2 การใช้อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งที่เหมาะสม โดยการปรับสภาวะของเครื่องแช่เยือกแข็งเพื่อใช้ในการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์ อัตราการแช่เยือกแข็งสูงที่สุด (fastest freezing rate) ที่ทำให้ความเค้นภายในที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอและน้อยกว่าความแข็งที่ผิวของผลิตภัณฑ์แล้ว อัตราเร็วนี้จะเป็นอัตราการแช่เยือกแข็งที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์นั้นๆโดยเฉพาะและไม่เป็นสาเหตุของการเกิดรอยร้าวขณะแช่เยือกแข็ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย