

บทที่ 2

ผลงานวิจัยและงานเขียนอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไข่กรอกปลา

ไข่กรอกปลา เป็นผลิตภัณฑ์จากปลาที่ชาวญี่ปุ่นเป็นคนริเริ่มขึ้นก่อนสงครามโลกครั้งที่ 2 แต่ไม่ได้รับความนิยมสำเร็จ จนกระทั่งในปี ค.ศ.1953 จึงได้รับความนิยมและได้เกิดโรงงานทำไข่กรอกปลาขึ้นในญี่ปุ่น อุตสาหกรรมประเภทนี้ได้ขยายตัวไปเรื่อยๆ (ประเสริฐ, 2514) ในการผลิตไข่กรอกสามารถใช้ปลาหลายชนิดเป็นวัตถุดิบ และอาจใช้ปลาเนื้อดำเป็นวัตถุดิบ แต่ปลาที่มีปริมาณเนื้อดำสูง เช่น แมคเคอร์เรล (mackerel) หรือซาร์ดีน (sardine) ไม่เหมาะสมสำหรับผลิตเป็นไข่กรอกปลาเนื่องจากจะทำให้ผลิตภัณฑ์สีแดงปนดำภายหลังการแปรรูป (สุทนต์, 2536)

พันธิพา และคณะ (2532) พบว่าการผลิตไข่กรอกอิมันชันปลาจำเป็นต้องมีไขมันในส่วนผสมปริมาณร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนักเนื้อปลา เนื่องจากไขมันจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีความขาวนวล ช่วยลดกลิ่นคาวปลา และช่วยให้ผลิตภัณฑ์นุ่มเนียนไม่แห้งกระด้าง

ฉัตรชัย และพงศธร (2548) ได้ทดลองผลิตไข่กรอกอิมัลชันปลาโอผสมซูริมิ (อัตราส่วน 2 : 3) สูตรลดไขมัน โดยผสมน้ำมันถั่วเหลือง และโปรตีนถั่วเหลืองสกัด (isolated soy protein) อัตราส่วน 1 : 1 ปริมาณร้อยละ 8 โดยน้ำหนักเนื้อปลา พบว่าผลิตภัณฑ์สูตรดังกล่าวมีคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสทุกด้านสูงกว่าสูตรที่ใช้โปรตีนถั่วเหลืองสกัดเพียงอย่างเดียว โดยผลิตภัณฑ์สูตรลดไขมันดังกล่าวมีค่าพลังงานลดลงร้อยละ 35 จากสูตรควบคุมที่ใช้น้ำมันถั่วเหลืองเพียงอย่างเดียว

2.2 ปลาทูน่า

ปลาทูน่าพันธุ์ท้องแถบ (Skipjack) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Katsuwonus pelamis* เป็นปลาทะเลที่อยู่ในวงศ์ Scombridae และอยู่ในวงศ์ย่อย Scombrinae เป็นปลาที่มีลำตัวกลมปากกว้าง ตาขนาดปานกลาง ครีบหลังเป็นก้านแข็ง ครีบหูมีขนาดเล็กปลายเรียวแหลม ข้างลำตัวมีลายแถบแตกต่างกันออกไป คือ มีสีดำสลับขาวเป็นแนวจากบริเวณครีบหูไปจนถึงครีบหาง หลังมีสีดำปนน้ำเงินเข้ม ท้องสีขาวเงินและมีหนังค่อนข้างบางถลอกออกได้ง่าย หางมีสีดำแข็งแรง ปลาทูน่าพันธุ์นี้จะมีขนาดเล็ก ลำตัวยาว 18-32 นิ้ว และน้ำหนัก 3-7 กิโลกรัม อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำที่มีอุณหภูมิ 15-25°C ปลาทูน่าพันธุ์ท้องแถบเป็นสายพันธุ์ที่มีอยู่อย่างมากมายและจำหน่ายมาก

เป็นอันดับแรก แต่เป็นปลาที่มีเนื้อน้อยและมีสีเข้ม จัดเป็นพันธุ์ที่มีคุณภาพต่ำกว่าพันธุ์ครีบลีงและครีบบาว (จเร และคณะ, 2555)

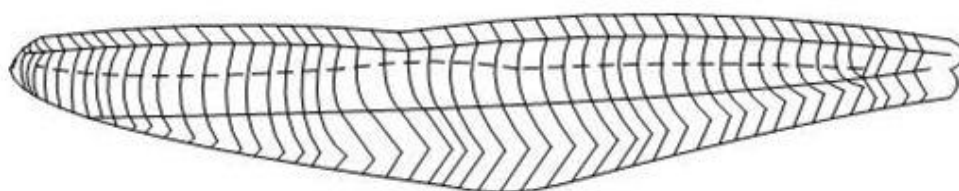


รูปที่ 2.1 ปลาทูนหัวทองแถบ (*Katsuwonus pelamis*)

ที่มา : FAO (2013)

2.2.1 กล้ามเนื้อของปลาทูนหัว

กล้ามเนื้อปลา (block of muscle, myotomes) เรียงตัวแบบ segment ally ห่อหุ้มด้วยเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (connective tissues) กล้ามเนื้อปลาและเนื้อเยื่อเกี่ยวพันนี้สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ดังรูปที่ 2.2 เมื่อสุกจะเห็นเป็นชั้น (flakes) เนื้อเยื่อเกี่ยวพันเมื่อได้รับความร้อนจะละลายกลายเป็นเจลทำให้เนื้อเยื่อแยกจากกันได้ง่าย (จเร และคณะ, 2555)

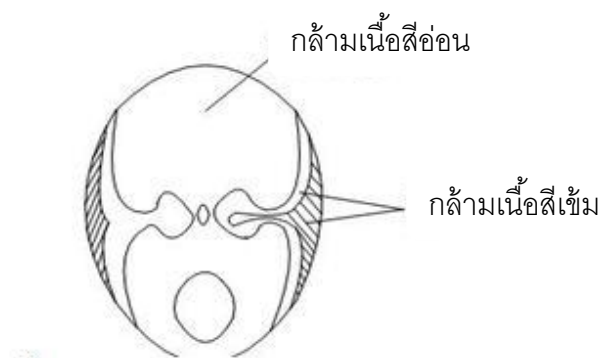


รูปที่ 2.2 ลักษณะการเรียงตัวของกล้ามเนื้อปลาทูนหัว

ที่มา : จเร และคณะ (2555)

ได้ผิวหนังปลาจะพบกล้ามเนื้อสีคล้ำ (red meat หรือ dark meat) อยู่สองข้างตามเส้นข้างตัว อัตราส่วนระหว่างกล้ามเนื้อสีคล้ำและสีอ่อน (light meat) แตกต่างกันไปตามชนิดของปลาและส่วนต่างๆ ของร่างกาย ปลาน้ำลึกมีปริมาณกล้ามเนื้อสีคล้ำน้อยกว่าปลาที่อาศัยอยู่บริเวณผิวน้ำ กล้ามเนื้อสีคล้ำ มีปริมาณเฮโมโพรตีน (haemoprotein) สูงและเป็นสารเริ่มต้นที่ทำให้ไขมันที่มีอยู่มากเสื่อมคุณภาพได้ง่าย เนื้อสีคล้ำทำหน้าที่เป็นคลังเก็บไขมัน

ไกลโคเจนและเมตาโบไลต์อื่นๆ ระดับของสารอินทรีย์และกรดที่ละลายได้รวมทั้งปริมาณฟอสฟอรัสในเนื้อสีคล้ำต่ำกว่าในเนื้อสีอ่อน (จเร และคณะ, 2555) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สัดส่วนกล้ามเนื้อสีอ่อนและสีเข้มตามภาพตัดขวางลำตัวของปลาทูลำทองแถบ
ที่มา : จเร และคณะ (2555)

2.2.2 องค์ประกอบหลักทางเคมีของปลาทูลำทอง (จเร และคณะ, 2555)

องค์ประกอบหลักของเนื้อปลา คือ น้ำ โปรตีน และไขมัน ซึ่งส่วนประกอบเหล่านี้รวมกันมีถึงร้อยละ 98 ของน้ำหนักปลาสด และองค์ประกอบที่เหลืออื่นๆ เช่น วิตามิน คาร์โบไฮเดรต และเกลือแร่มีอยู่ในปริมาณน้อย แต่ส่วนประกอบเหล่านี้มีความสำคัญต่อสภาพการเจริญตัวของกล้ามเนื้อปลากายหลังการตายซึ่งมีผลกับเนื้อสัมผัสของปลา

2.2.2.1 น้ำ

กล้ามเนื้อปลาประกอบด้วยน้ำร้อยละ 50-85 แตกต่างกันตามชนิดและถิ่นที่อยู่อาศัย การไม่กินอาหารของปลาในฤดูวางไข่ ทำให้พลังงานสะสมในกล้ามเนื้อลดลง ปริมาณน้ำในกล้ามเนื้อจึงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน (Sikorski และ Kotakowska, 1994) น้ำในตัวปลาไม่แข็งที่อุณหภูมิ 0°C แต่จะแข็งตัวที่ประมาณ -0.9°C เมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 0°C น้ำในตัวปลาจะแข็งตัวประมาณร้อยละ 90 เท่านั้น

2.2.2.2 โปรตีน

กล้ามเนื้อของปลาประกอบด้วยโปรตีน 2 ประเภท ตามลักษณะการละลาย คือ โปรตีนไม่ละลายน้ำ ได้แก่ โปรตีนที่ยึดเหนี่ยวกันทำให้เนื้อปลาเหนียวเหนียวของกล้ามเนื้อ ซึ่งมีประมาณร้อยละ 65-75 ของโปรตีนทั้งหมด รวมทั้งโปรตีนเนื้อเยื่อเกี่ยวพันซึ่งมีปริมาณน้อยกว่า มีประมาณร้อยละ 3-10 ของโปรตีนทั้งหมด และโปรตีนละลายน้ำ ได้แก่ ไกลโคโปรตีน เอนไซม์โปรตีนและไมโอโกลบินโปรตีน

2.2.2.3 ไขมัน

ไขมันพบได้ผิวหนังและกล้ามเนื้อ จำแนกได้ 2 ชนิด คือ ไขมันที่ร่างกายเก็บไว้ใช้พลังงาน (depot-fat) และไขมันที่ไม่ได้ถูกสะสมเพื่อใช้เป็นพลังงาน (non-depot-fat) ได้แก่ ฟอสโฟลิปิด

2.2.2.4 องค์ประกอบอื่นๆ

องค์ประกอบอื่นๆ เช่น คาร์โบไฮเดรต วิตามิน และแร่ธาตุมีอยู่ในปริมาณน้อย ส่วนประกอบทางเคมีของปลาหูฉลามสายพันธุ์ต่างๆ ขึ้นอยู่กับชนิด กายวิภาค (ตำแหน่งของร่างกายของปลา) และฤดูกาล ซึ่งปลาที่อาศัยอยู่ในแถบร้อนจะไม่พบความแตกต่างเรื่องฤดูกาลอย่างชัดเจน ปลาหูฉลามที่ไขมันสูงอาจเปลี่ยนสภาพเป็นปลาไขมันต่ำได้ตามฤดูกาลและแหล่งอาหาร องค์ประกอบทางเคมีของปลาหูฉลามสายพันธุ์ต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปลาหูฉลามสายพันธุ์ต่างๆ

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	สายพันธุ์ปลาหูฉลาม		
	Albacore	Skipjack	Yellow fin
น้ำ	62.3-78.6	68.0-71.1	67.3-77.1
โปรตีน	19.1-27.6	23.8-26.6	22.9-25.8
ไขมัน	0.7-18.2	0.3-7.4	0.1-9.5
คาร์โบไฮเดรต	0.2	-	-
เถ้า	1.2-2.4	1.3-1.7	1.3-1.5

ที่มา: จเร และคณะ (2555)

2.3 โปรตีนกล้ามเนื้อปลา

โปรตีนปลาสามารถแบ่งได้ 3 ชนิด เช่นเดียวกับโปรตีนของเนื้อสัตว์ชนิดอื่นๆ โดยแบ่งตามความสามารถในการละลายได้แก่

2.3.1 โปรตีนซาร์โคพลาสมิก (sarcoplasmic proteins)

ในปี 1988 Nakagawa และคณะ กล่าวว่า โปรตีนซาร์โคพลาสมิกเป็นโปรตีนในกล้ามเนื้อปลาซึ่งมีความสามารถในการละลายได้ในน้ำหรือสารละลายเกลือเจือจางที่มีความเข้มข้นของไอออนต่ำกว่า 0.1 (ionic strength) สำหรับโปรตีนในกลุ่มนี้ ได้แก่ ไมโอโกลบิน

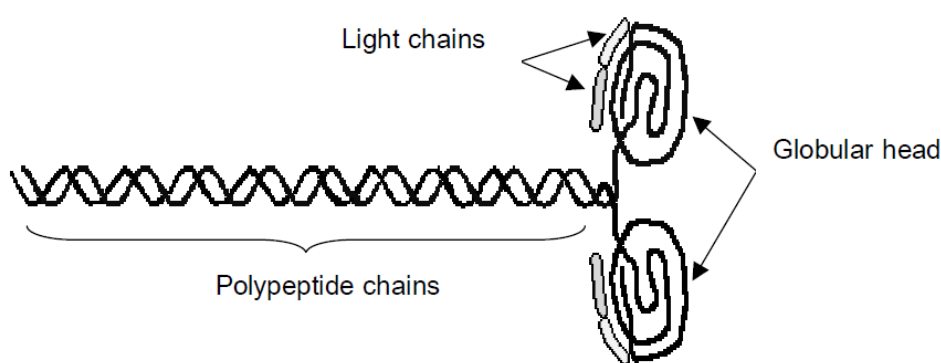
(myoglobin) เอนไซม์ (enzyme) และโปรตีนอัลบูมิน (albumin) ชนิดต่างๆ โดยทั่วไปพบว่า ปริมาณของโปรตีนซาร์โคพลาสมิคในปลาผิวน้ำ เช่น ปลาซาร์ดีน (sardine) และปลาแมคเคอเรล (mackerel) จะมีปริมาณสูงกว่าในปลาที่หากินตามหน้าดิน เช่น ปลา Plaice และ ปลา Snapper เป็นต้น โดยเฉพาะปริมาณของฮีโมโกลบิน (hemoglobin) และ ไซโตโครมซี (cytochrome - C) สำหรับผลของโปรตีนซาร์โคพลาสมิคต่อคุณภาพของเจลที่เตรียมได้จากปลานั้นพบว่า โปรตีนดังกล่าวมีผลไปขัดขวางการสร้างโครงร่างตาข่ายสามมิติ (gel network) ของโปรตีนไมโอซินในการเกิดเจล ทำให้เจลสามารถอุ้มน้ำได้น้อย (water holding) ค่าความแข็ง (hardness) และความยืดหยุ่น (elasticity) ต่ำ ดังนั้นในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากปลาเพื่อให้ได้เจลที่มีคุณภาพดีนั้น จึงมีความจำเป็นในการล้างเนื้อปลาด้วยน้ำเพื่อกำจัดเลือด กลิ่นคาวปลา และที่สำคัญคือ กำจัดโปรตีนซาร์โคพลาสมิคออกไป (Smith, 1991; Sikorski และ Kotakowska, 1994)

2.3.2 โปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ (myofibrillar protein)

เป็นโปรตีนที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (fibrous) ใช้ในการยึดหดตัวของกล้ามเนื้อโปรตีนในกลุ่มนี้สามารถละลายได้ในสารละลายเกลือที่มีความเข้มข้นของอิออนประมาณ 0.45 - 0.60 ดังนั้นจึงสามารถแยกโปรตีนเหล่านี้ออกจากเนื้อปลาบดได้ โดยการล้างเนื้อปลาบดด้วยสารละลายเกลือที่มีความเป็นกลางและมีความเข้มข้นของอิออนอยู่ในช่วงดังกล่าว ซึ่งความสามารถในการละลายในสารละลายเกลือของโปรตีนชนิดนี้พบว่ามีความสัมพันธ์แบบผกผันกับระดับการสูญเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีน (Suzuki, 1981) โปรตีนในกลุ่มนี้ได้แก่ ไมโอซิน (myosin) แอคติน (actin) โทรโปไมโอซิน (tropomyosin) และโทรโปนิน (troponin) ชนิด C, I และ T

ไมโอซินเป็นโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบหลักของโปรตีนในกลุ่มนี้ โดยมีโมเลกุลมีลักษณะเป็นสายยาวขนาดใหญ่ มวลโมเลกุลประมาณ 500,000 ดาลตัน ประกอบด้วยโปรตีน 2 หน่วยย่อย (subunit) คือไมโอซินสายหลัก (myosin heavy chain; MHC) 2 สายและไมโอซินสายเบา (myosin light chain; MLC) 4 หน่วยย่อย (รูปที่ 2.4) ไมโอซินสายหลักแต่ละสายประกอบด้วยส่วนหัว ซึ่งมีรูปร่างเป็นก้อนกลม เรียกว่า globular head และส่วนหาง ซึ่งส่วนหางของไมโอซินสายหลักแต่ละสายจะพันรอบซึ่งกันและกันเป็นเกลียวแอลฟาฮีลิกซ์ (α -helix) ซึ่งมีลักษณะเป็นแท่ง (rod shape) และแต่ละสายของไมโอซินสายหลักมีขนาด 200,000 ดาลตัน ที่บริเวณส่วนหัวของไมโอซิน (globular head) สามารถแสดงกิจกรรมของเอนไซม์เอทีพีเอส (ATPase) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของ ATP (adenosine triphosphate) เกิดเป็น ADP (adenosine diphosphate) และพลังงานซึ่งใช้ในการยึดหดตัวของ

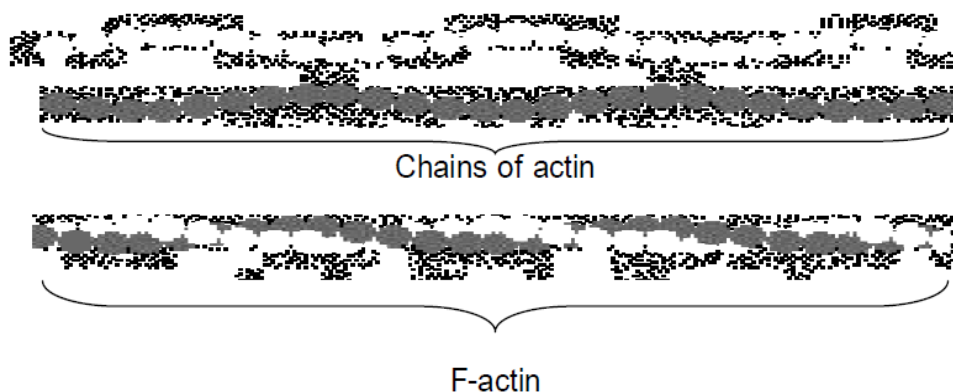
กล้ามเนื้อ นอกจากนี้ที่บริเวณส่วนหัวของไมโอซินยังมีความสามารถจับกับแอกติน (actin binding site) ซึ่งมีความสำคัญขณะหดและคลายตัวของกล้ามเนื้อ สำหรับไมโอซินสายเบาจะมีขนาดแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของสัตว์ โดยแต่ละหน่วยมีขนาดอยู่ระหว่าง 16,500-27,500 ดาลตัน ในการเกิดเจลพบว่าไมโอซินมีบทบาทช่วยให้เกิดความเหนียวและเจลมีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ดีโมเลกุลของไมโอซินมีหมู่ซัลไฮดริลที่เป็นอิสระและว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีจึงทำให้โมเลกุลไมโอซินเกิดการเปลี่ยนแปลงง่าย ถูกย่อยได้ง่ายด้วยทริปซิน และโคโมทริปซิน (Alais และ Linden, 1991; Sikorski และ Kotakowska, 1994)



รูปที่ 2.4 แบบจำลองโมเลกุลโปรตีนไมโอซิน

ที่มา : จุฬาลักษณ์ (2548)

แอกติน เป็นโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ที่พบรองลงมาโดยมีปริมาณร้อยละ 20 ของโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ (รูปที่ 2.5) หน่วยย่อยของแอกติน คือ จี-แอกติน (G-actin) ประกอบด้วยกรดอะมิโนจำนวน 374-375 อนุมูล และมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 42,000-48,000 ดาลตัน จี-แอกติน มีรูปร่างเป็นก้อนกลมและมีการจับตัวกันเป็นสายยาวเกิดเป็นเส้นใย เรียกว่า เอฟ-แอกติน (F-actin) สายยาวของเอฟ-แอกตินพันเรียงตัวเป็นเกลียวในลักษณะของ แอลฟาฮีลิกซ์ และสามารถมีอันตรกิริยากับส่วนหัวของไมโอซิน (Alais และ Linden, 1991; Sikorski และ Kotakowska, 1994)



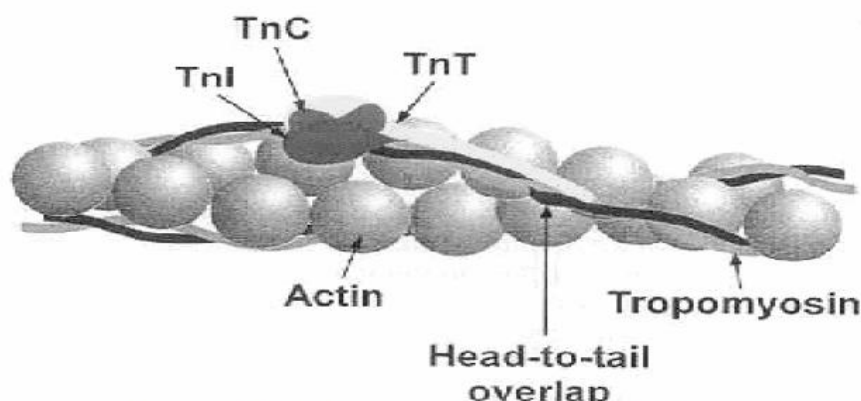
รูปที่ 2.5 แบบจำลองโมเลกุลโปรตีนแอกติน

ที่มา : จุฬาลักษณ์ (2548)

โทรโปไมโอซิน ประกอบด้วยสายพอลิเปปไทด์ 2 สาย (รูปที่ 2.6) ซึ่งพันกันเป็นเกลียวในลักษณะของแอลฟาฮีลิกซ์พอลิเปปไทด์แต่ละสายมีขนาดประมาณ 35,000-37,000 ดาลตัน โทรโปไมโอซินจะวางตัวอยู่บนแนวร่องของแอกตินในฟลาเมนต์เส้นบาง (thin filament) โดย 1 หน่วยของโทรโปไมโอซินจะวางตามแนวของจี-แอกติน 7 โมเลกุล และโทรโปไมโอซินเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ยึดกับโทรโปนินที ซึ่งองค์ประกอบที่เกิดขึ้นเป็นปัจจัยทำให้เกิดการคลายตัว (relaxing factor) ของกล้ามเนื้อ (Alais และ Linden, 1991; Sikorski และ Kotakowska, 1994) โทรโปนิน ประกอบด้วยหน่วยย่อย 3 ส่วน คือ หน่วยย่อย C ทำหน้าที่ในการจับ Ca^{2+} ขณะที่มีการยืดหดตัวของกล้ามเนื้อ มีขนาดโมเลกุลประมาณ 17,000-18,000 ดาลตัน หน่วยย่อย I มีบทบาทยับยั้งการจับตัวรวมกันระหว่างแอกตินกับไมโอซิน ซึ่งมีผลต่อการเกิดกิจกรรมของเอนไซม์เอทีพีเอสของแอกโตไมโอซิน มีขนาดโมเลกุลประมาณ 20,000-24,000 ดาลตัน และหน่วยย่อย T ทำหน้าที่เป็นส่วนที่เชื่อมระหว่างโทรโปไมโอซินกับแอกติน มีขนาดโมเลกุลประมาณ 37,000-40,000 ดาลตัน (Alais และ Linden, 1991; Sikorski และ Kotakowska, 1994)

2.3.3 โปรตีนสโตรมา (stroma protein)

เป็นโปรตีนในส่วนของเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน เป็นเนื้อเยื่อที่ช่วยยึดระหว่างเซลล์หรือกลุ่มของเนื้อเยื่ออื่นๆ ให้มีโครงสร้างหรือรูปร่างที่มีความแข็งแรง โดยโปรตีนในกลุ่มนี้ไม่สามารถสกัดได้ด้วยน้ำ กรด ด่าง เจือจาง และสารละลายเกลือที่เป็นกลางที่มีความเข้มข้น 0.01-0.1 โมลาร์ ส่วนประกอบของโปรตีนชนิดนี้ได้แก่ คอลลาเจน และอีลาสติน (Alais และ Linden, 1991; Sikorski และ Kotakowska, 1994)



รูปที่ 2.6 แบบจำลองโมเลกุลโปรตีนโทรโปไมโอซิน และโทรโปนิน C (TnC) โทรโปนิน I (TnI) และโทรโปนิน T (TnT)

ที่มา : จุฬาลักษณ์ (2548)

2.4 การเกิดเจลของโปรตีนกล้ามเนื้อปลา (Gelations of fish muscle proteins)

การเกิดเจลเป็นคุณสมบัติเชิงหน้าที่ที่สำคัญประการหนึ่งของโปรตีนปลา ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อสัมผัสหลากหลายชนิดที่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค โครงสร้างของเจลโปรตีนเกิดจากโมเลกุลของโปรตีนจับกันด้วยพันธะชนิดต่างๆ เป็นโครงร่างตาข่าย (cross link) ที่สามารถจับน้ำหรือสารอื่นที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำไว้ภายในได้ (Damodaran, 1996) ซึ่งการเกิดเจลของโปรตีนนั้นประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญ 2 ขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงโครงร่างโมเลกุลของโปรตีน ซึ่งมักจะเป็นผลจากการได้รับความร้อน หรือเกิดจากโปรตีนสูญเสียสภาพธรรมชาติด้วยปัจจัยอื่น เมื่อโปรตีนสูญเสียสภาพธรรมชาติจะพบว่าความหนืดของระบบเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการคลายตัวของโมเลกุล รวมกับการจับตัวรวมกันระหว่างโมเลกุลโปรตีนบางส่วนที่คลายตัวออกมา ต่อจากนั้นในขั้นตอนที่สองโปรตีนซึ่งสูญเสียสภาพธรรมชาติหรือโมเลกุลที่คลายตัวออกอย่างสมบูรณ์แล้วจะรวมตัวกันหรือจับกันอย่างซ้ำๆ (aggregation) ในระหว่างการจับตัวเพื่อเกิดเป็นโครงร่างตาข่าย ความหนืดของระบบจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และในระยะสุดท้ายระบบของเจลจะมีคุณสมบัติบางประการของของแข็งที่มีความยืดหยุ่น (Hermansson, 1978) อัตราการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนทั้งสองขั้นตอนจะต้องเกิดขึ้นในระดับที่เหมาะสม กล่าวคือ หากอัตราการสูญเสียสภาพธรรมชาติเกิดขึ้นเร็วกว่าอัตราการจับตัวกันของโปรตีน โครงร่างตาข่ายที่ได้จะไม่มีประสิทธิภาพ เจลที่ได้จะมีความแข็งแรงและยืดหยุ่นต่ำ

แต่ถ้าหากการสูญเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีนเกิดขึ้นในอัตราที่ไม่สูงเจลที่ได้จะมีความยืดหยุ่นและแข็งแรง ทั้งนี้อัตราการเปลี่ยนแปลงที่เหมาะสมจะเป็นการเอื้ออำนวยให้โมเลกุลโปรตีนมีเวลาในการจัดเรียงตัวอย่างมีระเบียบ และยึดเหนี่ยวซึ่งกันและกันเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายที่แข็งแรงมีความสมบูรณ์มากขึ้น หากการรวมตัวของโปรตีนที่สูญเสียสภาพธรรมชาติในขั้นตอนที่สองเกิดอย่างรวดเร็วจะมีผลทำให้โปรตีนจับตัวกันแบบสุ่มอย่างไม่เป็นระเบียบโครงสร้างของเจลที่ได้จะมีความสามารถในการอุ้มน้ำน้อย (Wong, 1989) ในปี 1994 Sano และคณะ ได้อธิบายไว้ว่าความร้อนมีผลให้โปรตีนแอคโตไมโอซินจากปลาแคร์พ (carp) เริ่มคลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 30°C และการคลายตัวของโปรตีนจะเกิดขึ้นตามลำดับ เมื่อระบบมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 30-50°C การคลายตัวดังกล่าวมีผลให้หมู่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และหมู่ซัลไฟไฮไดรลของโมเลกุลโปรตีนเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างหมู่ไม่ชอบน้ำและพันธะไดซัลไฟด์ในช่วงอุณหภูมินี้ การรวมตัวของโปรตีนจะเกิดขึ้นสูงสุดระหว่างอุณหภูมิ 40 - 60°C เมื่ออุณหภูมิของระบบสูงกว่า 40°C โปรตีนไมโอซินจะแยกตัวออกจากโปรตีนแอคโตไมโอซิน ซึ่งสามารถจับตัวระหว่างกันและกันได้ โดยผลจากการจับตัวดังกล่าวจะก่อให้เกิดเจลโปรตีนที่ละลายน้ำได้ต่ำ และเมื่อนำเจลมาทำให้เย็น ความแข็งแรงของเจลจะเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากบทบาทของพันธะไฮโดรเจน นอกจากนี้ความแข็งแรงของเจลยังเกี่ยวข้องกับพันธะ ϵ -(γ -glutamyl)-lysine ซึ่งเป็นพันธะโควาเลนต์ที่เกิดจากการเชื่อมโยงระหว่างกลุ่มแกมมาคาร์บอกซีเอไมด์ (γ -carboxy amide) ของกรดอะมิโนกลูตามีน (glutamine) และกลุ่มแอมฟิซิลอนอะมิโน (ϵ -amino) ของกรดอะมิโนไลซีน (lysine) โดยการทำงานของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส (transglutaminase) (Tsukamasa และ Shimizu, 1989; Shimizu และคณะ, 1981)

2.5 ชูริมิ

เนื้อปลาบดชูริมิ คือ เนื้อปลาบดซึ่งผ่านการล้างด้วยน้ำ กำจัดสี กลิ่น ไขมัน และสารที่ละลายน้ำได้ ทำให้เนื้อปลาบดมีสีขาวไม่มีกลิ่นและรส มีคุณสมบัติเหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความเหนียวและยืดหยุ่น เช่น ลูกชิ้น ไส้กรอก ปลาที่นิยมใช้ในการทำชูริมิ คือ ปลาทูลายแดง ปลาจวด ปลาตาหวาน ปลาปากคม เป็นต้น (วรรณวิบูลย์, 2539) การนำเนื้อปลาบดมาประกอบอาหารบางชนิด เช่น ลูกชิ้นปลา ไส้กรอกปลา ความเหนียวของผลิตภัณฑ์จะเป็นปัจจัยสำคัญมากที่สุด จากการศึกษาเกี่ยวกับความเหนียวของเนื้อปลาบดพบว่าความเหนียวจะขึ้นอยู่กับปริมาณโปรตีนไมโอซิน ถ้ามีสูงจะยืดหยุ่นได้ดี (นงนุช, 2538)

กระบวนการผลิตซูริมิเริ่มจากการตัดหัว ควักไส้ และแยกเนื้อออกจากกระดูกในลักษณะเนื้อปลาสด ล้างเนื้อปลาด้วยน้ำเพื่อกำจัดโปรตีนที่ละลายน้ำได้ และองค์ประกอบที่ไม่ต้องการ เช่น เลือด ไขมัน รวมทั้งเอนไซม์ ส่งผลให้ปริมาณโปรตีนไมโอไฟบริลลาสูงขึ้น ทำให้เกิดเจลดีขึ้น การล้างนิยมล้างด้วยน้ำเย็น (อุณหภูมิ 5-10°C) แล้วกำจัดน้ำเพื่อลดความชื้นในซูริมิ ความชื้นในซูริมิที่ยังไม่เติมสารป้องกันการสูญเสียสภาพของโปรตีน ควรมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 85 จากนั้นผสมเนื้อปลาสดกับสารป้องกันการสูญเสียสภาพของโปรตีนระหว่างการแช่แข็ง ได้แก่ กรดมาลิก กรดแลคติก โมโนและไดแซ็กคาไรด์ สารประกอบฟอสเฟต เอธิลีนไกลคอลและซอร์บิทอล (สุทธวัฒน์, 2536)

2.6 ระบบอิมัลชันของเนื้อสัตว์

ผลิตภัณฑ์ที่ใส่กรอบดัดละเอียดอิมัลชันมีขั้นตอนพื้นฐานมาจากการสร้างอิมัลชัน โดยการทำให้ของเหลว 2 ชนิดที่ปกติจะรวมตัวกันไม่ได้ให้อยู่ร่วมกันได้ คือ น้ำและไขมัน ซึ่งอาศัยโปรตีนที่ได้จากการสกัดออกมาจากเนื้อสัตว์เป็นตัวประสาน ที่เรียกว่าอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) หรืออาจเติมสารอื่น ๆ ลงไปในส่วนผสมเพื่อทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ด้วย เช่น โปรตีนถั่วเหลือง เป็นต้น (เยาวลักษณ์, 2536)

เนื่องจากอิมัลชันในผลิตภัณฑ์เนื้อเป็นประเภทไขมันในน้ำ (oil in water emulsion) เม็ดไขมันจะทำหน้าที่เป็นตัวกระจาย (discontinuous or internal phase) ซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีปริมาณน้อย ในขณะที่น้ำเป็นส่วนผสมที่มีปริมาณมากกว่าจะถูกเรียกว่า ตัวแทรก (continuous or external phase) ดังนั้น การที่เม็ดไขมันสามารถกระจายตัวอยู่ในน้ำได้ จะต้องอาศัยอิมัลซิไฟเออร์ทำหน้าที่ห่อหุ้มเม็ดไขมันที่กระจายอยู่ไม่ให้กลับมารวมตัวกัน ซึ่งอิมัลซิไฟเออร์ที่ทำหน้าที่นี้ได้แก่ โปรตีนไมโอซิน ที่ได้จากการสกัดโปรตีนจากเนื้อสัตว์ ซึ่งเป็นโปรตีนที่ละลายได้ดีในน้ำเกลือ พบว่า การสกัดโปรตีนไมโอซินจะทำได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นการสร้างอิมัลชันจึงต้องกระทำในขณะที่ส่วนผสมเย็น คือ ขั้นตอนการสับผสมหรือการนวด อุณหภูมิของส่วนผสมไม่ควรเกิน 16°C ซึ่งทำได้โดยการนำเนื้อสัตว์ และส่วนผสมอื่นๆ แช่เย็นไว้ก่อนการสับผสม การเติมน้ำแข็งก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ช่วยให้ส่วนผสมเย็น หรือการสับผสมในห้องปรับอากาศจะช่วยรักษาความเย็นของส่วนผสมได้ดี

ปัจจัยที่มีผลต่อความคงตัวของระบบอิมัลชันของเนื้อสัตว์

(1) คุณภาพและปริมาณของเนื้อแดง ถ้าหากคุณภาพของเนื้อที่ใช้ในกระบวนการผลิตไส้กรอกอิมัลชันมีปริมาณคอลลาเจนมากเกินไป หรือปริมาณเนื้อแดงน้อยเกินไป จะส่งผลให้อิมัลชันมีความคงตัวไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากปริมาณโปรตีนไมโอซินจากเนื้อแดงไม่เพียงพอที่จะห่อหุ้มเม็ดไขมันได้

(2) อุณหภูมิการสับผสม ควรมีอุณหภูมิของการสับผสมไม่เกิน 16°C ถ้าหากอุณหภูมิสูงเกินไป จะทำให้การสกัดไมโอซินจากเนื้อสัตว์เกิดขึ้นแบบไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะทำให้ได้อิมัลชันที่ไม่คงตัว ดังนั้นควรมีการควบคุมอุณหภูมิ เช่น การเติมน้ำแข็งเกล็ดลงไปในช่วงการสับผสม รวมถึงนำเนื้อและไขมันไปแช่เย็นหรือแช่แข็งก่อนนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์

(3) ระยะเวลาในการสับผสม การสับผสมหรือนวดนานเกินไป ทำให้เม็ดไขมันมีขนาดเล็กลงซึ่งเป็นการเพิ่มหน้าตัดให้มากขึ้น ส่งผลให้โปรตีนไมโอซินในส่วนผสมไม่สามารถห่อหุ้มเม็ดไขมันไว้ได้หมด ทำให้ระบบอิมัลชันไม่มีความคงตัว

2.7 การใช้น้ำมันพืชในผลิตภัณฑ์ไส้กรอกอิมัลชัน

น้ำมันพืชเป็นไขมันชนิดหนึ่งที่ยิมนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตผลิตภัณฑ์ไส้กรอกปลาเนื่องจากปราศจากคอเลสเตอรอลและมีปริมาณไขมันไม่อิ่มตัวสูง ซึ่งการนำน้ำมันพืชมาใช้จะช่วยลดปริมาณคอเลสเตอรอลในผลิตภัณฑ์จึงส่งผลดีต่อสุขภาพของผู้บริโภค และทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถจำหน่ายในตลาดอาหารฮาลาลได้ แต่อย่างไรก็ตามด้วยคุณสมบัติของน้ำมันพืชที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องเมื่อนำไปใส่ในกระบวนการผลิตไส้กรอกจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อสัมผัสที่ไม่ดี ดังนั้นจึงมีการดัดแปลงหรือเปลี่ยนคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันพืชเพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้น (Javidipour และ Vural, 2002)

Paneras และ Bloukas (1994) รายงานว่า การใช้น้ำมันมะกอก น้ำมันข้าวโพด น้ำมันดอกทานตะวัน หรือน้ำมันถั่วเหลือง ทดแทนมันหมูแข็งในผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพรงค์เฟอร์เตอร์ไขมันต่ำจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาณไขมันรวม ค่าพลังงานและคอเรสเตอรอลลดลง แต่ปริมาณผลผลิตที่ได้ ความแน่นเนื้อและความชุ่มน้ำของผลิตภัณฑ์จะลดลง

ปริญา (2545) พบว่าน้ำมันถั่วเหลืองสามารถใช้เป็นส่วนผสมของไขมันในไส้กรอกปลาอิมัลชันที่ผลิตจากปลาตาหวานได้ โดยการใช้ไขมันถั่วเหลืองร้อยละ 10 ร่วมกับไข่ขาวสดร้อยละ 3 โดยน้ำหนักเนื้อปลา จึงจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีคะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้าน

รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองในไส้กรอกปลาดังกล่าวจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าลักษณะเนื้อสัมผัสและค่าแรงต้านการเคี้ยวลดลง แต่ค่าการเสียน้ำมันหลังทำให้สุกเพิ่มขึ้น

Vural และคณะ (2004) พบว่าการนำน้ำมันพืชผสมระหว่างน้ำมันปาล์ม น้ำมันมะกอกและน้ำมันเมล็ดฝ้าย มาผ่านกระบวนการอินเตอเรสเตอร์ฟิเคชัน (interesterification) สามารถนำมาใช้ทดแทนไขมันวัวในการผลิตไส้กรอกแฟรงค์เฟอร์เตอร์ไขมันต่ำได้ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสทางด้านลักษณะปรากฏ สี เนื้อสัมผัส และกลิ่นรส ไม่แตกต่างจากสูตรควบคุม (ไขมันวัวร้อยละ 10)

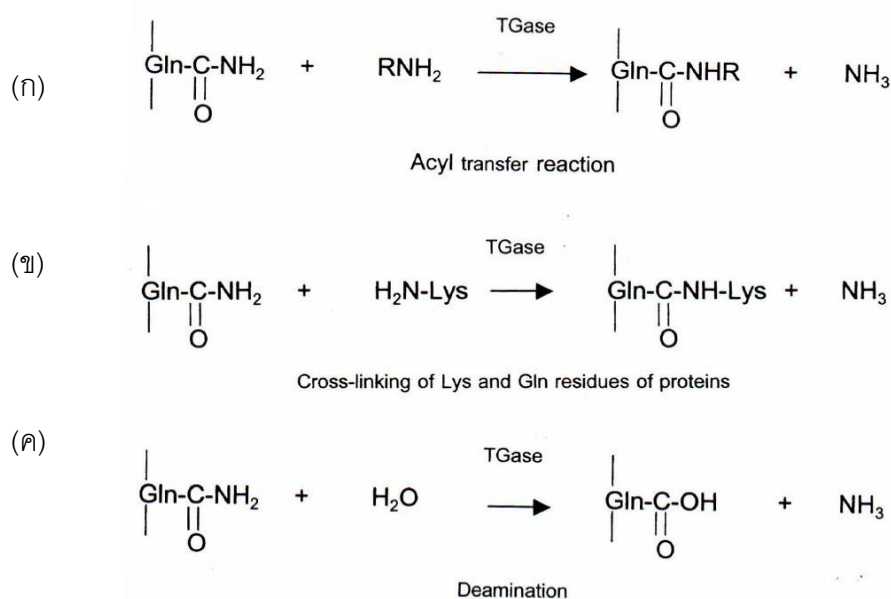
Panpipat และ Yongsawatdikul (2008) พบว่า การเสริมโปแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) 150 $\mu\text{g}/100\text{ g}$ และการใช้น้ำมันปลาทดแทนน้ำมันถั่วเหลืองร้อยละ 2-10 โดยน้ำหนักรวม ไม่มีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกอิมัลชันปลาตุ๋นระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C นอกจากนี้ปริมาณ KI ที่ระดับ 150 $\mu\text{g}/100\text{ g}$ ไม่มีผลในการเร่งการเกิดออกซิเดชันของไขมัน แต่ปริมาณน้ำมันปลาที่เพิ่มขึ้นทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดกลิ่นหืนจากการออกซิเดชันของไขมันมากขึ้น ทั้งนี้ น้ำมันปลาสามารถใช้ทดแทนน้ำมันถั่วเหลืองในผลิตภัณฑ์ไส้กรอกอิมัลชันปลาตุ๋นได้เพียงร้อยละ 10 ของปริมาณน้ำมันถั่วเหลือง หรือเพียงร้อยละ 2 โดยน้ำหนักรวม

Valencia และคณะ (2008) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการใช้น้ำมันปลา และน้ำมันลินสีด (linseed oil) โดยเตรียมน้ำมันให้เป็นส่วนผสมอิมัลชันของน้ำมัน น้ำอุ่น (50°C) และโปรตีนถั่วเหลืองสกัด อัตราส่วน 5 : 5 : 1 นำมาใช้ทดแทนมันหมูแข็งปริมาณร้อยละ 15 ในการผลิตไส้กรอกหมู บรรจุถุงพลาสติก PVC ที่ภาวะความดันบรรยากาศ เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C พบว่าผลิตภัณฑ์ทั้งสองกลุ่มไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าสี และลักษณะเนื้อสัมผัส แต่สูตรน้ำมันปลา มีคะแนนความชอบโดยรวม และกลิ่นรสลดลง และมีค่า Thiobarbituric acid reactive substance (TBARS) เพิ่มมากกว่าสูตรน้ำมันลินสีด ตลอดการเก็บรักษา 7 วัน

2.8 เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส (Transglutaminase; TGase)

เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส หรือ TGase มีชื่อตามระบบว่า proteinglutamine: amine γ -glutamyltransferase และชื่อตามรหัสคือ EC 2.3.2.13 โครงสร้างของ TGase มีหมู่ซีสเทอีนที่ช่วยให้เกิดปฏิกิริยากับ γ -carboxamide ของอนุโมลกุลลูตามีนในโปรตีนเกิดเป็น γ -glutamyl thioester และปลดปล่อยแอมโมเนีย หลังจากนั้น γ -glutamyl thioester จะทำ

ปฏิกิริยากับหมู่เอมีนเกิดเป็นพันธะ isopeptide หรือพันธะ γ -glutamyl polyamide (Greenberg และคณะ, 1991) ในกรณีที่ไม่มีเอมีน น้ำสามารถทำหน้าที่เป็นตัวรับหมู่ acyl เป็นผลให้กลูตามีนเปลี่ยนเป็นกลูตามิก (Folk และ Chung, 1973) นอกจากนี้กลุ่ม primary amino ที่มีไลซีนหรือพอลิเอมาйдสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับส่วนปลายของกลูตามีนเกิดเป็นพันธะ ϵ -(γ -glutamyl) lysine ระหว่างโปรตีนหรือ γ -glutamyl polyamide เป็นผลให้เกิดพันธะโควาเลนต์ที่มีความคงตัวและทนต่อการย่อยสลาย (Greenberg และคณะ, 1991) TGase ก่อให้เกิดการเชื่อมประสานของโปรตีนโดยพันธะโควาเลนต์ทั้งในและนอกโมเลกุล รูปที่ 2.7 แสดงปฏิกิริยาซึ่งเร่งโดย TGase ในสภาวะที่มีตัวรับหมู่ acyl แตกต่างกันไป (Motoki และ Seguro 1998; สุธวัณณ์ และวรรณพ, 2541; ปราณี, 2543) จากการศึกษาคุณสมบัติและการทำงานของ TGase ที่พบจากแหล่งต่างๆ พบว่า TGase ทำงานได้ดีในช่วง pH ประมาณ 5-8 อุณหภูมิที่เหมาะสมไม่เกิน 40°C และสูญเสียเอนไซม์ตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 2.7 การทำงานของ TGase ในสภาวะที่มีตัวรับหมู่ acyl ทำปฏิกิริยาต่างๆ กัน

(ก) acyl-transferase reaction

(ข) crosslinking reaction

(ค) deamination

ที่มา: Ashie และ Lanier (1999)

2.8.1 ผลการเชื่อมพันธะ G-L ต่อสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีน

การเชื่อมพันธะ G-L ทั้งภายในและระหว่างโพลีเปปไทด์ โดย TGase จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของโปรตีน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นการเปลี่ยนแปลงที่มีประโยชน์อย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบ (ประพันธ์, 2544) โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

2.8.1.1 ความสามารถในการเกิดเจล

โปรตีนที่ไม่สามารถเกิดเจลตามธรรมชาติเมื่อผ่านการทำปฏิกิริยา โดย TGase จะมีความสามารถในการเกิดเจลได้ ยกตัวอย่าง เช่น สารละลายเคซีนซึ่งเป็นโปรตีนจากนมจะเกิดเจลได้หลังจากการเชื่อมพันธะ G-L นอกจากนี้ถ้าเป็นโปรตีนที่สามารถเกิดเจลได้โดยการให้ความร้อน เช่น โปรตีนถั่วเหลือง และไมโอซิน ซึ่งเป็นโปรตีนจากเนื้อสัตว์ การเชื่อมพันธะ G-L โดย TGase จะมีผลทำให้โปรตีนดังกล่าวเกิดเจลได้โดยไม่ต้องใช้ความร้อน ความแข็งแรงของเจลโปรตีนดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับปริมาณของพันธะ G-L ที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามการเชื่อมพันธะ G-L ในโปรตีนมากเกินไป ก็มีผลทำให้ความแข็งแรงของเจลลดลงได้เช่นเดียวกัน (Kuraishi และคณะ, 1996)

2.8.1.2 ความหนืด

โปรตีนที่ผ่านการเชื่อมพันธะ G-L โดย TGase จะมีขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้น มีผลทำให้สารละลายของโปรตีนดังกล่าวมีความหนืดสูงขึ้น ความหนืดของสารละลายโปรตีนจะสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับปริมาณของพันธะ G-L ที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถควบคุมได้โดยควบคุมสภาวะของการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ ระยะเวลาของปฏิกิริยา อุณหภูมิ และความเข้มข้นของเอนไซม์ที่ใช้ เป็นต้น

2.8.1.3 ความเสถียรต่อความร้อน

เนื่องจากพันธะ G-L ในโปรตีนที่เกิดขึ้นโดย TGase เป็นพันธะโควาเลนต์เจลของโปรตีนดังกล่าว จึงมีความเสถียรต่อความร้อนสูง โดยปกติเจลของเจลาติน (gelatin) จะเป็นเจลประเภทผันกลับได้โดยความร้อน (thermoreversible) เนื่องจากพันธะที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจลดังกล่าวเป็นเพียงพันธะไฮโดรโฟบิก (hydrophobic interaction) แต่การเชื่อมพันธะ G-L ในเจลาติน จะทำให้ได้เจลที่ทนต่อความร้อนสูงได้ถึง 120°C โดยไม่เกิดการหลอมเหลวกลับคืน (Kuraishi และคณะ, 1996)

2.8.1.4 ความสามารถในการอุ้มน้ำ

ความสามารถในการอุ้มน้ำของเจลจากโปรตีนเป็นสมบัติที่ต้องการในการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด เจลของโปรตีนที่ผ่านการเชื่อมพันธะ G-L โดย TGase จะมีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ดี สามารถใช้ลดปัญหาการแยกตัวของน้ำ (syneresis) ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายประเภทได้เป็นอย่างดี ตัวอย่างเช่น โยเกิร์ตที่ผลิตจากนํ้านมที่ผ่านการทำปฏิกิริยาโดย TGase จะมีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ดีขึ้น และสามารถป้องกันการแยกตัวของน้ำในผลิตภัณฑ์ดังกล่าวได้ (Kuraishi และคณะ, 1996)

2.8.2 การใช้ TGase ในอุตสาหกรรมอาหาร

จากการที่ TGase เร่งปฏิกิริยาการเชื่อมพันธะ G-L ในโมเลกุลของโปรตีน มีผลทำให้โปรตีนที่ไม่เกิดเจลโดยการให้ความร้อนสามารถเกิดเจลได้ และเจลที่ได้มีความแข็งแรงเสถียรต่อความร้อน นอกจากนี้โปรตีนในสภาพของอิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำ (oil in water emulsion) ก็สามารถเกิดเจลได้ดีแม้ว่าจะมีน้ำตาลและ/หรือเกลือในส่วนผสม โดยที่เจลดังกล่าวจะไม่ถูกทำลายโดยสารที่มีสมบัติทำให้โปรตีนสูญเสียสภาพธรรมชาติ ด้วยสมบัติต่างๆ ดังกล่าวทำให้ TGase มีศักยภาพสูงในการนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการแปรรูปอาหารประเภทต่างๆ (ประพันธ์, 2544) ดังนี้

2.8.2.1 ผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์

เนื่องจาก TGase มีคุณสมบัติในการเชื่อมพันธะระหว่างโมเลกุลของโปรตีนจึงสามารถใช้ TGase ในการเชื่อมเนื้อชิ้นเล็กๆ ที่เป็นผลพลอยได้จากการตัดแต่งเนื้อสัตว์หรือเนื้อที่ได้จากเนื้อติดกระดูกเพื่อการผลิตเนื้อชิ้นรูป (restructured meat) ซึ่งถือได้ว่าเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเนื้อสัตว์ที่เป็นวัตถุดิบราคาถูก

วิธีดั้งเดิมที่ใช้ในการผลิตเนื้อชิ้นรูปดังกล่าว ได้แก่ การใช้เกลือโซเดียมคลอไรด์ร่วมกับการให้ความร้อน หรือการแช่แข็งในการทำให้เกิดการเชื่อมกันระหว่างชิ้นเนื้อเล็กๆ ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะจำหน่ายในรูปของเนื้อปรุงสุกหรือเนื้อแช่แข็ง อย่างไรก็ตามผู้ผลิตและผู้บริโภคในปัจจุบันได้เล็งเห็นปัญหาสุขภาพมากขึ้น โดยให้ความสนใจในผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่ำ ดังนั้นการผลิตเนื้อชิ้นรูปโดยใช้ TGase จึงมีข้อได้เปรียบ กล่าวคือ TGase สามารถเชื่อมชิ้นเนื้อเล็กๆ เข้าด้วยกัน โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยเกลือโซเดียมคลอไรด์ และไม่จำเป็นต้องใช้ความร้อนหรือการแช่แข็ง (Kuraishi และคณะ, 1997) อย่างไรก็ตาม TGase สามารถทำงานได้ดีในสภาวะที่มีเกลือด้วยเช่นเดียวกัน (Motoki และ Seguro, 1998) ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถจำหน่ายในรูปของเนื้อสัตว์แช่เย็นเช่นเดียวกับเนื้อสดทั่วไป

นอกจากนี้ยังมีรายงานการใช้ TGase จากเชื้อดหมูในการผลิตลูกชิ้นไก่ที่มีปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่ำ โดยได้ผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อสัมผัสดี (Tseng และคณะ, 2000)

นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ TGase ในการผลิตผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ไขมันต่ำ ตัวอย่างเช่น การใช้โปรตีนจากนมที่ผ่านการเชื่อมพันธะ G-L เป็นสารทดแทนไขมันในผลิตภัณฑ์ประเภทไส้กรอก เป็นต้น

2.8.2.2 ผลิตภัณฑ์เนื้อปลา

TGase เป็นเอนไซม์ที่มีอยู่ในเนื้อปลาตามธรรมชาติ โดยพบปริมาณมากน้อยต่างกันตามแต่ละชนิดของปลา และเชื่อกันว่า TGase เป็นเอนไซม์ที่มีบทบาทสำคัญในการเกิดปรากฏการณ์ซูวาริ (suwari) ซึ่งมีผลทำให้เนื้อปลาลบเกิดเจลโปรตีนที่มีคุณภาพดี และเป็นสิ่งที่ต้องการในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ใช้เนื้อปลาลบหรือซูริมิ (surimi) เป็นวัตถุดิบ (สุทธวัฒน์ และวรรณพ, 2541) ดังนั้นการเติม TGase เพื่อเชื่อมพันธะ G-L ของโปรตีนในเนื้อปลาลบจึงเป็นแนวทางการปรับปรุงคุณภาพเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์จากเนื้อปลาได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้การเชื่อมพันธะ G-L ดังกล่าวยังช่วยลดการสูญเสียลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดี รวมทั้งคุณค่าทางโภชนาการในผลิตภัณฑ์จากเนื้อปลาแช่แข็ง อันเนื่องมาจากการละลายน้ำแข็งและการปรุงอาหาร (Motoki และ Seguro, 1998)

2.9 เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์ (Microbial Transglutaminase; MTGase)

ในปี 1980 เริ่มมีการผลิต TGase จากจุลินทรีย์ โดยใช้ชื่อว่า MTGase ต่อมา Motoki และคณะ (1989) และ Ando และคณะ (1989) ทำการสำรวจความเป็นไปได้ในการผลิตเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์โดยการคัดเลือกจุลินทรีย์ประมาณ 5000 สายพันธุ์ โดยแยกจากดินหลายๆ สถานที่ จากการคัดเลือกพบว่าสายพันธุ์ *Streptovorticillium* S8112 มีประสิทธิภาพในการผลิตเอนไซม์ชนิดนี้ Motoki และคณะ (1989) รายงานว่า สายพันธุ์ของ *Streptovorticillium* อื่นๆ เช่น *S. griseocarneum*, *S. cinnamoneum* และ *S. mobaraense* มีความสามารถในการผลิตเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสได้เช่นเดียวกัน จากการทดสอบอาหารเลี้ยงเชื้อของ *Streptomyces* sp. พบว่า มีกิจกรรมของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสด้วยการตรวจสอบกิจกรรมของเอนไซม์สามารถทำได้โดยใช้ hydroxamate assay ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์นั้นจะขับเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสออกมาในอาหารเลี้ยงเชื้อที่เป็นอาหารเหลว

กระบวนการหมักสำหรับการผลิตเอนไซม์มีหลักการเช่นเดียวกับการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ (Ando และคณะ, 1989, 1992; Motoki และคณะ, 1989) ดังนี้ แหล่งของคาร์บอน ได้แก่ กลูโคส ซูโครส แป้ง glycerine และเดกซ์ทริน แหล่งของไนโตรเจนที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์สามารถใช้แอมโมเนียมไนเตรต (NH_4NO_3) แอมโมเนียมซัลเฟต $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$ ยูเรีย (urea) โซเดียมไนเตรต (NaNO_3) แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) ถั่ว ข้าว ข้าวโพด ข้าวสาลีหรือแป้งข้าวสาลี รำข้าว น้ำแช่ข้าวโพด (maize-steep liquid) เปปโตน meat extract เคซีน กรดอะมิโน และ yeast extract เกลือแร่ที่จำเป็นและแร่ธาตุที่มีความสำคัญ เช่น ฟอสเฟต แมกนีเซียม โพแทสเซียม เหล็ก ทองแดง สังกะสี และวิตามิน นอกจากนี้สามารถเติม non-ion surfactant และสามารถใช้ลดการเกิดฟองได้ถ้าจำเป็น การเลี้ยงเชื้อเป็นแบบ aerobic fermentation ดังนั้น การเขย่าจึงมีความจำเป็น อุณหภูมิสำหรับการเจริญและการผลิตเอนไซม์จะมีค่าอยู่ระหว่าง 25°C และ 35°C ตามลำดับ ระยะเวลาในการหมักขึ้นอยู่กับสถานะในการเลี้ยงเชื้อและการประเมินค่ากิจกรรมของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสสูงสุดโดยปกติจะใช้เวลา 2-4 วัน

เอนไซม์ MTGase เป็นเอนไซม์แบบ extracellular enzyme ซึ่งเอนไซม์จะละลายอยู่ในน้ำหมัก ดังนั้น สามารถนำเอนไซม์ออกมาได้โดยการกรองแยกส่วนที่เป็นของแข็งออกจากของเหลว วิธีทั่วไปที่ใช้ในการทำเอนไซม์ให้บริสุทธิ์สามารถใช้สารละลายต่างๆ เช่น เอทานอล อะซิโตน ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์และตัวทำละลายอินทรีย์อื่นๆ สามารถนำมาใช้ในกระบวนการ down-stream processing วิธีการแยกโปรตีนด้วยการตกตะกอนด้วยเกลือแอมโมเนียมซัลเฟต และเกลือโซเดียมคลอไรด์ การทำ dialysis ultrafiltration ionexchange chromatography absorption chromatography gel filtration และ isoelectric point method ซึ่งวิธีการเหล่านี้สามารถนำมาทำให้เอนไซม์มีความบริสุทธิ์มากขึ้นได้ นอกจากนี้การเพิ่มประสิทธิภาพของเอนไซม์สามารถทำได้โดยการใช้วิธีการดังกล่าวร่วมกัน เอนไซม์ที่ได้สามารถนำไปผสมกับสารเพิ่มความคงตัว เช่น เกลือชนิดต่างๆ น้ำตาล โปรตีน ไขมัน และสารลดแรงตึงผิว (Sakamoto และคณะ, 1992)

ลักษณะเฉพาะของเอนไซม์ MTGase ผลิตโดย *Streptovorticillium mobaraense* ซึ่งประกอบด้วยกรดอะมิโน 331 อนุโมล มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 40 กิโลดาลตัน และเป็นโปรตีนที่มีเพียงหนึ่งหน่วยย่อย (subunit) เอนไซม์ดังกล่าวมีค่า pI ประมาณ 8.9 สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ดีที่สภาวะความเป็นด่างในช่วง pH 5-8 และมีความเสถียรที่อุณหภูมิ 50°C แต่จะสูญเสียการทำงานอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 70°C (Motoki และ Seguro, 1998) MTGase มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมพันธะ G-L ของโปรตีนหลายประเภท ได้แก่ โปรตีน

ถั่วเหลือง โปรตีนนม โปรตีนไข่ โปรตีนเนื้อสัตว์ และโปรตีนปลา เป็นต้น ลักษณะเด่นของ MTGase ซึ่งแตกต่างจาก TGase จากแหล่งอื่นๆ คือ MTGase ไม่ต้องการ Ca^{2+} ในการเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่ TGase ทั่วไปจำเป็นต้องมี Ca^{2+} เป็นโคแฟกเตอร์ (cofactor) คุณสมบัติดังกล่าวจัดเป็นข้อได้เปรียบในการนำ MTGase ไปใช้ประโยชน์ เนื่องจากโปรตีนในอาหารหลายชนิด เช่น เคซีน (caseins) ไมโอซิน และโกลบูลินจากถั่วเหลือง (soybean globulins) จะเกิดการตกตะกอนได้ง่ายในสภาวะที่มี Ca^{2+} จากคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้นทำให้ MTGase มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้กับกระบวนการแปรรูปอาหารในระดับอุตสาหกรรม (ประพันธ์, 2544)

2.10 สารไฮโดรคอลลอยด์ (hydrocolloids)

2.10.1 ความหมายของสารไฮโดรคอลลอยด์ (นิธิยา, 2551)

สารไฮโดรคอลลอยด์ หรือไฮโดรฟิลิกคอลลอยด์ หมายถึง สารประกอบประเภทโพลีแซ็กคาไรด์กัม (polysaccharide gums) ซึ่งเป็นโพลิเมอร์สายยาวและมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ในโมเลกุลอาจประกอบด้วยโมโนโพลีแซ็กคาไรด์ชนิดเดียวกันทั้งหมดเป็นไฮโมโพลีแซ็กคาไรด์ เช่น เดกซ์เทรน (dextran) และฟอสโฟแมนแนน (phosphomannan) หรือประกอบด้วยโมโนโพลีแซ็กคาไรด์หลายชนิด เป็นเฮเทอโรโพลีแซ็กคาไรด์ เช่น กัมอาราบิก (gum arabic) และกัมคารายา (gum karaya) เป็นต้น

คำว่า กัม (gums) เป็นภาษาอียิปต์ หมายถึง สารที่มีลักษณะเหนียว (sticky substance) ดังนั้นเมื่อโพลีแซ็กคาไรด์กัมละลายหรือกระจายตัวอยู่ในน้ำจะทำให้สารที่ได้มีความหนืดสูงหรือมีลักษณะเป็นเจล ในอุตสาหกรรมอาหารจึงได้นำเอาโพลีแซ็กคาไรด์กัมไปใช้ประโยชน์เป็นสารเพิ่มความคงตัว (stabilizer) สารเพิ่มความหนืด (thickener) อิมัลซิไฟเออร์ และหน้าที่อื่นๆ ในผลิตภัณฑ์อาหารของสารไฮโดรคอลลอยด์ แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 หน้าที่ของสารไฮโดรคอลลอยด์ในผลิตภัณฑ์อาหาร

หน้าที่ของสารไฮโดรคอลลอยด์	ชนิดผลิตภัณฑ์อาหาร
Adhesive	Bakery glaze
Binding agent	Sausages
Calorie control agent	Dietetic foods
Crystallization inhibitor	Ice cream, sugar syrups
Clarifying agent	Beer, wine
Cloud agent	Fruit juice
Coating agent	Confectionery
Emulsifier	Salad dressing
Encapsulating agent	Powdered flavors
Film former	Sausage casing, protective coating
Flocculating agent	Wine
Foam stabilizer	Whipped topping, beer
Gelling agent	Pudding, desserts, aspics
Molding	Gum drops, jelly candies
Protective colloid	Flavor emulsifiers
Stabilizer	Beer, mayonnaise
Suspending agent	Chocolate milk
Swelling agent	Processed meats
Thickening	Jams, pie filling, sauces
Water binding (prevents syneresis)	Cheese, frozen foods
Whipping agent	Topping, icings

ที่มา : Sharma (1981)

2.10.2 ชนิดของสารไฮโดรคอลลอยด์

สารไฮโดรคอลลอยด์สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ตามแหล่งที่มา ได้แก่

2.10.2.1 สารไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้จากธรรมชาติ

(natural hydrocolloids)

คือ สารไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้จากส่วนต่างๆ ของพืชได้แก่ เมล็ด ยาง เช่น โลคัสبینกัม (locust bean gum) กัมอาราบิก (gum arabic) ได้จากราก ลำต้น เช่น แป้ง ได้จากสาหร่าย เช่น คาราจีแนน (carrageenan) หรือได้มาจากสัตว์ เช่น ไคติน (chitin) หรือจาก กระบวนการหมักโดยเชื้อจุลินทรีย์ เช่น แซนแทนกัม (xanthan gum)

2.10.2.2 สารไฮโดรคอลลอยด์ที่ดัดแปรจากสารที่ได้จากธรรมชาติ

(modified natural hydrocolloids)

คือ สารไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้มาด้วยกระบวนการต่างๆ ได้แก่ อนุพันธ์ของเซลลูโลส เช่น คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC)

2.10.2.3 สารไฮโดรคอลลอยด์ที่สังเคราะห์ขึ้น

(synthetic hydrocolloids)

เช่น โพลีเอทิลีนออกไซด์โพลีเมอร์ (polyethylene oxide polymers)

2.10.3 ลักษณะโครงสร้างของสารไฮโดรคอลลอยด์

สารไฮโดรคอลลอยด์ที่มีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันจะมีสมบัติที่ต่างกัน ดังนี้

2.10.3.1 โครงสร้างโพลิเมอร์แบบเชิงเส้น (linear)

สารไฮโดรคอลลอยด์ที่มีโครงสร้างโพลิเมอร์แบบเชิงเส้นเมื่อ ละลายน้ำหรือกระจายตัวจะให้ความหนืดสูง เกิดเจลและคงตัว (retrogradation) ได้ง่าย เช่น อาการ์ (agar) อัลจิเนต (alginate) เซลลูโลส (cellulose) และเพกติน (pectin) เป็นต้น

2.10.3.2 โครงสร้างโพลิเมอร์แบบเชิงเส้นที่มีสายกิ่งก้าน (linear with side chains)

สารไฮโดรคอลลอยด์ที่มีโครงสร้างโพลิเมอร์แบบเชิงเส้นที่มีสาย กิ่งก้านเมื่อละลายน้ำหรือกระจายตัวจะให้ความหนืดสูง ปกติจะไม่เกิดเจลแต่จะเกิดเจลได้เมื่ออยู่ ร่วมกับสารประกอบอื่นๆ ในสภาวะที่เหมาะสม เช่น กัวร์กัม (guar gum) และโกลคัสبینกัม (locust bean gum)

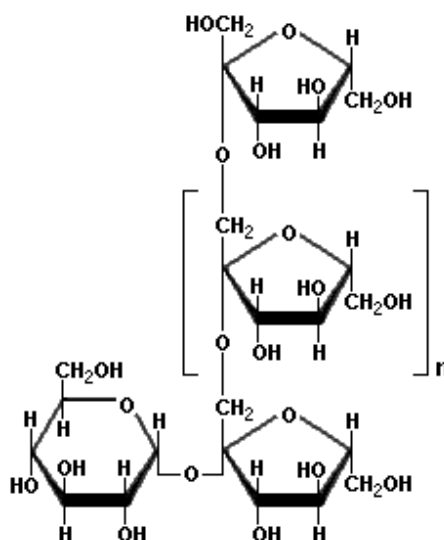
2.10.3.3 โครงสร้างโพลิเมอร์แบบมีกิ่งก้าน (Branched chains)

สารไฮโดรคอลลอยด์ที่มีโครงสร้างโพลิเมอร์แบบมีกิ่งก้านเมื่อละลายน้ำหรือกระจายตัวจะให้ความหนืดต่ำ แต่มีความคงตัว ไม่เกิดเจล และมีความเหนียว เช่น กัมอาราบิก (gum arabic)

2.10.4 อินูลิน (Inulin) (มาลี, 2550)

อินูลิน เป็นสารโพลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharides) ที่พืชเก็บไว้เป็นอาหาร พบในพืชมากกว่า 36,000 ชนิด เช่น Chicory root เห็ด หัวหอม หัวกระเทียม กลัวย แต่อินูลินย่อยไม่ได้โดยน้ำย่อยในลำไส้ แต่สามารถย่อยได้โดยเอนไซม์อินูลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ สารประเภทนี้สามารถใช้ทดแทนไขมันและสารให้ความหวานซึ่งจะให้พลังงาน 1-1.2 กิโลแคลอรีต่อกรัม จัดอยู่ในกลุ่มของไฟเบอร์ สกัดจาก chicory root สารชนิดนี้สามารถนำไปใช้ในการทดแทนไขมันในผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ เช่น โยเกิร์ต ชีส ผลิตภัณฑ์ขนมหวานแช่เยือกแข็ง ผลิตภัณฑ์นมอบ วิปครีม ผลิตภัณฑ์นม fiber supplement และ ผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์ ตัวอย่างอินูลินทางการค้าที่ใช้เป็นสารทดแทนไขมัน ได้แก่ Raftiline[®], Fruitafit[®] และ Fibruline[®]

อินูลิน เป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลฟรุกโทสที่เชื่อมต่อกันเป็นเส้นตรงที่ตำแหน่ง β - 2, 1 linked polyfructan และมีโมเลกุลของกลูโคส 1 โมเลกุลอยู่ที่ปลายด้านหนึ่งตามขนาดของโครงสร้างอินูลินมีค่า Degree of Polymerization (DP) ประมาณ 2-60 และตามโครงสร้างจะมี Fructo-Oligosaccharides ประกอบอยู่เป็นโครงสร้างกลุ่มย่อย



รูปที่ 2.9 โครงสร้างเคมีของอินูลิน

ที่มา: Food Wiki (2013)

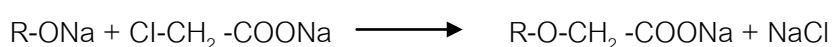
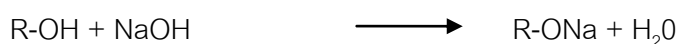
Careres และคณะ (2004) ได้ศึกษาผลของฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ (Fructo-Oligosaccharides; FOS) ต่อลักษณะทางประสาทสัมผัสของไส้กรอกปรุงสุก โดยมีการเติม FOS ร้อยละ 12 ของผลิตภัณฑ์สุดท้ายในไส้กรอกที่มีการลดไขมันลงร้อยละ 40 จากสูตรมาตรฐาน พบว่า ลักษณะเนื้อสัมผัสในด้านความแข็ง ความยืดหยุ่น และการยึดเกาะกันของตัวอย่างที่มีการเติม FOS ร้อยละ 12 มีค่าไม่แตกต่างกันจากสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

García และคณะ (2006) ได้ศึกษาผลของอินูลินต่อลักษณะเนื้อสัมผัสและลักษณะทางประสาทสัมผัสของ Mortadella ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เนื้อปรุงสุกจากสเปน โดยมีการเติมลงไปในรูปแบบร้อยละ 7.5 ของผลิตภัณฑ์สุดท้าย ในไส้กรอกที่มีการลดไขมัน พบว่า ลักษณะเนื้อสัมผัสของไส้กรอกที่มีการเติมอินูลินร้อยละ 6 ในด้านความแข็งมีค่าน้อยกว่าและมีความชุ่มน้ำที่ต่ำกว่าสูตรควบคุม ($p \leq 0.05$) เนื่องจากอินูลินสามารถอุ้มน้ำได้ดีทำให้ผลิตภัณฑ์มีความชุ่มน้ำและส่งผลให้มีความแข็งลดลงด้วย ส่วนการเกาะติดกันของตัวอย่างมีค่าไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$)

นอกจากนี้ Salazar และคณะ (2009) ได้ศึกษาฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์สายสั้น (FOS) ในไส้กรอกชนิดหมักแห้ง โดยมีการเติม FOS ร้อยละ 6 ลงในไส้กรอกหมักแห้งที่มีปริมาณไขมันลดลงร้อยละ 80 จากสูตรมาตรฐาน เปรียบเทียบกับสูตรควบคุม พบว่า ลักษณะเนื้อสัมผัสในด้านความแข็งของสูตรที่มีการเติม FOS ลงไป มีค่ามากกว่าสูตรควบคุม เนื่องจาก FOS มีความสามารถในการอุ้มน้ำไว้ ส่วนความยืดหยุ่น และการยึดเกาะกันของตัวอย่างของตัวอย่างที่มีการเติม FOS ร้อยละ 6 มีค่าไม่แตกต่างกันจากสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

2.10.5 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethylcellulose; CMC)

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เป็นไฮโดรคอลลอยด์กึ่งสังเคราะห์ ที่เป็นอนุพันธ์เซลลูโลสอีเทอร์ที่อยู่ในรูปเกลือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส อาจเรียกว่า เซลลูโลสกัม (cellulose gum) หรือใช้ชื่อย่อว่า CMC เป็นพอลิเมอร์ชนิดประจุลบที่ละลายได้ในน้ำ เนื่องจากการเตรียม CMC ทำได้โดยใช้เซลลูโลสบริสุทธิ์มาทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้เส้นใยเซลลูโลสของตัวอย่างได้เป็นสารละลายเซลลูโลสในด่าง แล้วทำปฏิกิริยาต่อกับโซเดียมโมโนคลอไรด์ได้เป็นโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ดังสมการ



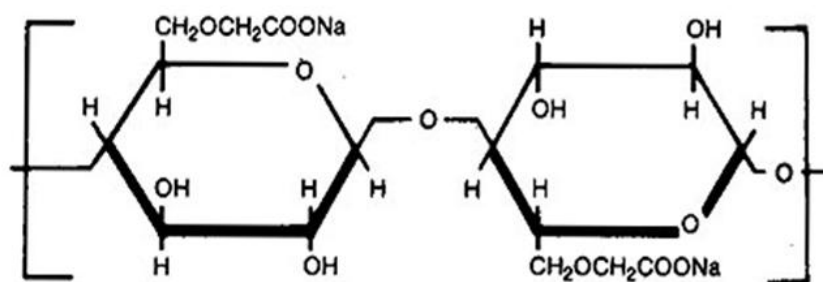
โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

สารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาการแทนที่ดังกล่าวจะทำให้ได้คาร์บอกซี-เมทิลเซลลูโลสหลายชนิด ซึ่งสมบัติของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแต่ละชนิดจะผันแปรไปตามปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความสม่ำเสมอของการแทนที่ (uniformity of substitution) degree of substitution (DS) และ degree of polymerization (DP) นอกจากนี้สมบัติของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแต่ละชนิดยังขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค ความสามารถในการดูดน้ำ และความหนืดของสารละลายอีกด้วย

Degree of substitution (DS) เป็นจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลบนโมเลกุลของแอนไฮโดรกลูโคส (anhydroglucose) ซึ่งจะถูกแทนที่ด้วยหมู่คาร์บอกซีเมทิล โดยทางทฤษฎีโมเลกุลของแอนไฮโดรกลูโคสมีหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ ดังนั้นควรจะมี DS เป็น 3 แต่ในทางปฏิบัติปฏิกิริยาเกิดขึ้นจริงๆ จะได้ DS น้อยกว่า 3 คือ มี DS อยู่ในช่วง 0.4 - 1.2 เท่านั้น คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารจะมี DS ประมาณ 0.9 ทำให้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ละลายได้ทั้งในน้ำร้อนและน้ำเย็น คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มี DS 0.3 หรือต่ำกว่าจะละลายได้ในต่างประเทศ ไม่ละลายน้ำ และจะเริ่มละลายในน้ำเมื่อมี DS ตั้งแต่ 0.45 ขึ้นไป สำหรับความหนืดของสารละลายจะขึ้นอยู่กับ DP ถ้ามี DP สูง จะทำให้ได้สารละลายที่มีความหนืดเพิ่มขึ้น ความหนืดของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสยังผันแปรขึ้นอยู่กับชนิดของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เช่น สารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสความเข้มข้นร้อยละ 2 อาจให้ความหนืดได้ตั้งแต่ 10 - 50,000 เซนติพอยส์ก็ได้ และสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีลักษณะคล้ายซูดอพลาสติก คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะได้สารละลายที่มีความหนืดต่ำ และมีความเป็นซูดอพลาสติกน้อยกว่าสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยทั่วไปสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะมีความคงตัวที่ pH ช่วงกว้าง 4-10 แต่จะให้ค่าความหนืดสูงสุด และมีความคงตัวดีที่สูง มีค่า pH ช่วง 7 - 9 ความหนืดของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะลดลงเมื่อ pH ลดลงและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ถ้า pH ต่ำกว่า 3 อาจทำให้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่อยู่ในรูปกรดอิสระตกตะกอน และถ้า pH สูงกว่า 10 จะทำให้สารละลายมีความหนืดลดลงเล็กน้อย

ความคงตัวของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสยังขึ้นอยู่กับชนิดของอิออนอีกด้วย ดังนั้นจึงมีกฎทั่วไปว่าถ้าเป็นเกลือของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เกิดจากอิออนประจุบวกที่มีเวเลนซ์ 1 (monovalent cation) จะละลายได้ดีในน้ำ แต่ถ้าเป็นอิออนประจุบวกที่มีเวเลนซ์ 2 (divalent cation) จะได้สารละลายที่มีลักษณะขุ่น และมีความหนืดลดลง ถ้าเป็นอิออนประจุบวกที่มีเวเลนซ์ 3 (trivalent cation) จะได้สารละลายเกลือที่ไม่ละลายน้ำ

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสใช้เติมลงในไอศกรีมจะช่วยอุ้มน้ำ ลดการเคลื่อนตัวของน้ำ ทำให้ไอศกรีมมีลักษณะเนื้อนุ่ม และเมื่อไอศกรีมแข็งตัวจะไม่เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ และยังใช้เติมลงในอาหารเพื่อให้อาหารมีพลังงานต่ำ (low calorie food) โดยทำหน้าที่เป็น bulking agent และยังสามารถนำมาทำเป็นฟิล์มใสและความแข็งแรงโดยไม่มีผลกระทบจากน้ำมัน และตัวทำละลายอินทรีย์อีกด้วย



รูปที่ 2.10 โครงสร้างเคมีของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC)

ที่มา : นิธิยา (2544)

2.11 การทดสอบทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนา (ปราชญ์, 2551)

การทดสอบเชิงพรรณนา (descriptive test) หมายถึง การวิเคราะห์หารายละเอียดที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของผลิตภัณฑ์ หรือลักษณะที่แสดงคุณภาพ (quality characteristic) พร้อมบอกระดับความเข้มของลักษณะดังกล่าวในสเกลทางประสาทสัมผัส ผู้ทดสอบจะต้องเป็นผู้ที่ผ่านการฝึกฝนมาอย่างเพียงพอ เนื่องจากการวิเคราะห์รายละเอียดลักษณะคุณภาพทั้งชนิดและปริมาณจะต้องแม่นยำ และเชื่อถือได้ โดยผู้ทดสอบจะถูกคัดเลือก และฝึกฝนให้มีความสามารถในการแยกแยะ การจดจำ การเปรียบเทียบ แล้วสามารถรายงานการรับรู้ต่างๆ นั้นได้

การทดสอบเชิงพรรณนา ประกอบด้วยแนวทางการวิเคราะห์ 4 ด้าน คือ

2.11.1 การวิเคราะห์ลักษณะคุณภาพ (quality characteristics analysis)

หมายถึง การวิเคราะห์รายละเอียดของผลิตภัณฑ์โดยอาศัยประสาทการรับรู้ของมนุษย์ (human sense) ลักษณะคุณภาพต่างๆ ได้แก่

2.11.1.1 ลักษณะปรากฏ (appearance)

เป็นลักษณะทั่วไปที่มองเห็นได้ เช่น สี ลักษณะเนื้อสัมผัส ขนาด รูปร่าง เป็นต้น

2.11.1.2 กลิ่น (odor / aroma)

เป็นความรู้สึกที่รับรู้ได้ทางจมูก

2.11.1.3 กลิ่นรส (flavor)

เป็นความรู้สึกที่รับรู้ได้ภายในปากทางด้านกลิ่น รสชาติ และความรู้สึกอื่นๆ ที่เกิดขึ้น เช่น ร้อน เผ็ด เย็น เป็นต้น

2.11.1.4 เนื้อสัมผัส (texture)

เป็นความรู้สึกด้านแรงที่ใช้ในการบดเคี้ยวตัวอย่าง และลักษณะทางด้านรูปร่าง รูปทรงของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสัมผัสด้วยมือ หรือการสัมผัสภายในช่องปาก เหงือก ลิ้น เพดานปาก เป็นการรับรู้ด้านความรู้สึกต่อเนื้อสัมผัสของตัวอย่าง เริ่มตั้งแต่ ริมฝีปาก ฟันหน้า ฟันหลัง ฟัน ลิ้น เพดานปาก เช่น ความหยาบ ความแข็ง ความเปราะ เป็นต้น

2.11.1.5 สิ่งตกค้าง (aftertaste)

เป็นความรู้สึกที่รับรู้ได้ภายหลังจากกลืนตัวอย่างไปแล้ว เช่น รสชาติตกค้างในปาก หรือลักษณะเนื้อสัมผัสที่ตกค้าง เป็นต้น

2.11.2 การวิเคราะห์ความเข้มของลักษณะคุณภาพ (intensity of quality characteristic analysis)

เป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณ จะวิเคราะห์ต่อจากรายละเอียดลักษณะคุณภาพที่วิเคราะห์ได้ เป็นขั้นตอนการประเมินความเข้มของลักษณะต่างๆ โดยใช้สเกลต่างๆ เช่น สเกลบอกระดับขั้น (category scale) สเกลเส้นบอกระดับคะแนน (line scale) หรือสเกลประมาณค่า (magnitude estimation; ME) เป็นต้น

2.11.3 การจัดลำดับความรู้สึก (order of perception)

การจัดลำดับความรู้สึกต่อชนิด และระดับของลักษณะคุณภาพเป็นวิธีการที่เกี่ยวข้องกับเวลา การรับรู้ของประสาทสัมผัสแต่ละชนิดมีความไวแตกต่างกัน ซึ่งการวิเคราะห์นี้เป็นการจัดลำดับก่อนและหลังของความรู้สึกที่รับรู้ได้ตั้งแต่เริ่มชิม ขณะชิม และหลังจากชิมตัวอย่างแล้ว

2.11.4 ความรู้สึกรวม หรือการรับรู้องค์รวม (overall impression)

เป็นการวิเคราะห์ความรู้สึกจากการรับรู้ทุกด้านอย่างต่อเนื่อง โดยพบว่าในบางครั้งความรู้สึกในแต่ละรายละเอียด เช่น รสชาติ เนื้อสัมผัส อาจจะน้อยเกินไป แต่เมื่อหลายลักษณะมารวมกันจะได้ความรู้สึกรวมที่ดีได้ เช่น ความเข้มของรสชาติโดยรวม ความกลมกล่อม เป็นต้น

ในการทดสอบเชิงพรรณนา ต้องอาศัยผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนแล้วมาอย่างดี ขั้นตอนการทดสอบจะเริ่มจากให้ผู้ทดสอบประเมิน และบันทึกความรู้สึกเกี่ยวกับลักษณะทางประสาทสัมผัสต่างๆ ที่ได้จากผลิตภัณฑ์ กำหนดคำศัพท์ และคำจำกัดความที่ใช้อธิบายลักษณะทางประสาทสัมผัสที่ได้ กำหนดตัวอย่างอ้างอิงที่ใช้เปรียบเทียบ จัดลำดับความสำคัญและการรับรู้ของแต่ละลักษณะพร้อมกำหนดสเกลคะแนน และฝึกฝนให้ผู้ทดสอบคุ้นเคยกับตัวอย่างอ้างอิง จากนั้นจึงเริ่มทดสอบกับตัวอย่าง

การทดสอบเชิงพรรณนามีอยู่หลายวิธี ได้แก่ การวิเคราะห์ทดสอบหาลักษณะเฉพาะทางกลิ่นรส (flavor profile method) การวิเคราะห์ทดสอบหาลักษณะเฉพาะทางเนื้อสัมผัส (texture profile method) การวิเคราะห์รายละเอียดเชิงปริมาณ (quantitative descriptive analysis; QDA) การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของเวลา ความเข้ม (time-Intensity profile method) และ การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางประสาทสัมผัสแบบอิสระ (free-choice profile method; FCP) เป็นต้น (คณาจารย์ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์, 2549)

ในปี 2007 Rahman และคณะ ใช้การวิเคราะห์รายละเอียดเชิงปริมาณ (quantitative descriptive analysis; QDA) โดยใช้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 9 คน เพื่อประเมินตัวอย่างไส้กรอกปลา พบว่าลักษณะทางประสาทสัมผัสที่ผู้ทดสอบพบในตัวอย่างคือ hardness brittleness adhesiveness และ firmness นอกจากนี้ยังมีการกำหนดคำนิยามวิธีการประเมิน และตัวอย่างอ้างอิง เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ตรงกันระหว่างผู้ทดสอบในการประเมินตัวอย่าง

ในปี 2012 Petridis และคณะ ศึกษาลักษณะทางประสาทสัมผัสของไส้กรอกแฟรงเฟิร์ตเตอร์ โดยใช้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 10 คน ประเมินตัวอย่างด้านเนื้อสัมผัส พบว่าลักษณะทางเนื้อสัมผัสที่ผู้ทดสอบทำการประเมิน ได้แก่ hardness consistency elasticity fatness chewiness และ red color intensity โดยผู้ทดสอบจะถูกฝึกฝนให้เกิดความคุ้นเคยกับลักษณะต่างๆ ที่ต้องทำการประเมิน รวมถึงมีความเข้าใจในวิธีการประเมิน ตัวอย่างอ้างอิง

2.12 การทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค (ปราณี, 2551)

การทดสอบการยอมรับ (acceptance test) เป็นวิธีการที่ผู้บริโภคเท่านั้นที่สามารถบอกได้ เป็นการทดสอบที่มาจากการรับรู้ ทัศนคติ ความคิดเห็น ความชอบ และการตอบรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์นั้นๆ ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เช่น การรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ยังคงอยู่ในความต้องการของผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมาย

การปรับปรุงผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์อยู่ในทิศทางเดียวกับที่ผู้บริโภคต้องการ หรือการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ เพื่อหาแนวคิดจากผู้บริโภคไปเป็นแนวคิดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

2.12.1 สเกลที่ใช้ในการทดสอบการยอมรับ

การทดสอบการยอมรับสามารถทำได้หลายรูปแบบ เพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะของผลิตภัณฑ์ และผู้บริโภค เช่น การสัมภาษณ์ และการใช้แบบทดสอบเป็นเครื่องมือ โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้สเกลกำหนดระดับความชอบ ได้แก่

2.12.1.1 วิธีทดสอบฮีโดนิค (hedonic test)

สเกลแบบฮีโดนิคมีสเกลทั้งแบบตัวเลข (numerical hedonic scale) และแบบตัวหนังสือ (verbal hedonic scale) ซึ่งมีหลายระดับ เช่น 3 5 7 และ 9 จุด (ตารางที่ 2.3)

ตารางที่ 2.3 สเกลฮีโดนิคสำหรับการทดสอบการยอมรับ

สเกลตัวเลข และตัวหนังสือ							
9 จุด		7 จุด		5 จุด		3 จุด	
1	ไม่ชอบมากที่สุด	1	ไม่ชอบมาก	1	ไม่ชอบมาก	1	ไม่ชอบ
2	ไม่ชอบมาก	2	ไม่ชอบปานกลาง	2	ไม่ชอบ	2	บอกไม่ได้ว่าชอบ
3	ไม่ชอบปานกลาง	3	ไม่ชอบเล็กน้อย	3	บอกไม่ได้ว่าชอบ		หรือไม่ชอบ
4	ไม่ชอบเล็กน้อย	4	บอกไม่ได้ว่าชอบ		หรือไม่ชอบ	3	ชอบ
5	บอกไม่ได้ว่าชอบ		หรือไม่ชอบ	4	ชอบ		
	หรือไม่ชอบ	5	ชอบเล็กน้อย	5	ชอบมาก		
6	ชอบเล็กน้อย	6	ชอบปานกลาง				
7	ชอบปานกลาง	7	ชอบมาก				
8	ชอบมาก						
9	ชอบมากที่สุด						

ที่มา: ดัดแปลงจากปราวณี (2551)

2.12.1.2 วิธีทดสอบสเกลพอดี (just-about-right; JAR test)

ตัวอย่างสเกลพอดีแสดงดังตารางที่ 2.4 เป็นสเกลที่เข้าใจง่าย และให้ข้อมูลทิศทางของการเปลี่ยนแปลงได้ แต่มีข้อจำกัดคือไม่สามารถบ่งชี้คะแนนจริงของความชอบได้ และข้อมูลที่ได้ไม่ใช่ข้อมูลแบบ interval data

2.12.1.3 วิธีสเกลรอยยิ้ม หรือลายหน้า (smiley scale / face scale)

หมายถึงสเกลภาพแสดงระดับความพอดิ์ด้านสีหน้า ลักษณะสเกลคล้ายคลึงกับสเกลแบบฮีโดนิค แต่ใช้สัญลักษณ์รูปหน้าแทน เหมาะสำหรับผู้ทดสอบที่เป็นเด็ก เพื่อให้เข้าใจแบบทดสอบได้ง่ายขึ้น

ตารางที่ 2.4 สเกลพอดีสำหรับการทดสอบการยอมรับ

แบบ 3 จุด	แบบ 5 จุด	แบบ 7 จุด
- รสหวานน้อยเกินไป	- รสหวานน้อยเกินไปมาก	- รสหวานน้อยเกินไปมากที่สุด
- รสหวานพอดี	- รสหวานน้อยเกินไป	- รสหวานน้อยเกินไปมาก
- รสหวานมากเกินไป	- รสหวานพอดี	- รสหวานน้อยเกินไป
	- รสหวานมากเกินไป	- รสหวานพอดี
	- รสหวานมากเกินไปมาก	- รสหวานมากเกินไป
		- รสหวานมากเกินไปมาก
		- รสหวานมากเกินไปมากที่สุด

ที่มา: ดัดแปลงจากปราณี (2551)

2.12.2 สถานที่ในการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค (เพ็ญขวัญ, 2536)

ต้องมีการควบคุมสภาวะให้เหมาะสม หากทำการทดสอบในสถานที่ที่ต่างกันจะให้ผลการทดสอบที่ต่างกัน แม้จะเป็นตัวอย่างเดียวกัน การควบคุมสถานที่ทดสอบเพื่อลดอคติของผู้ทดสอบ กำจัดตัวแปรอื่นๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ สถานที่ทดสอบสามารถแบ่งออกได้ ดังนี้

2.12.2.1 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ (laboratory test)

เป็นการทดสอบที่ต้องการควบคุม ตัวแปรที่จะมีอิทธิพลรบกวนความสามารถในการรับรู้ มีข้อได้เปรียบ คือ สามารถควบคุมการเตรียม และการเสิร์ฟไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ แต่เป็นการทดสอบที่ไม่เป็นไปตามรูปแบบบรรยากาศการบริโภคจริง ดังนั้นข้อมูลที่ได้จึงอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้

2.12.2.2 การทดสอบในที่สาธารณะ (central location test)

เป็นการทดสอบในสถานที่ที่มีผู้บริโภคอยู่จำนวนมาก เช่น แหล่งชุมนุม งานแสดงสินค้า ศูนย์การค้า ซึ่งสามารถใช้ผู้บริโภคจำนวนมากได้ จำนวนผู้ทดสอบโดยทั่วไปประมาณ 30-500 คน ข้อดีของการทดสอบนี้ คือ ผลการทดสอบที่ได้เป็นความจริง และน่าเชื่อถือ เนื่องจากผู้ทดสอบสามารถสอบถามผู้ดำเนินการทดสอบได้เมื่อมีข้อสงสัย กลุ่มผู้ทดสอบเป็นผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมายที่ได้รับการคัดเลือก แต่มีข้อเสียเปรียบด้านการควบคุมตัวอย่าง และสภาพแวดล้อม ผู้ทดสอบอาจได้รับการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมมาก ดังนั้นแบบสอบถามที่ใช้ควรเข้าใจง่าย มีความชัดเจน

2.12.2.3 การทดสอบที่บ้าน (home-use test)

เป็นการทดสอบที่ให้ผู้ทดสอบนำตัวอย่างกลับไปใช้ที่บ้าน เป็นการจำลองการบริโภคที่เหมือนจริง ข้อมูลที่ได้จะเป็นข้อมูลที่ได้จากความรู้สึกที่มาจากความคุ้นเคยในการใช้จริง ความชอบหรือการยอมรับผลิตภัณฑ์เกิดจากการใช้ซ้ำ มากกว่าความรู้สึกที่ใช้เพียงครั้งแรก แต่การทำสอบวิธีนี้ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูง เวลานาน และอาจได้รับการตอบกลับน้อย

2.12.3 จำนวนผู้ทดสอบในการทดสอบการยอมรับผู้บริโภค

จำนวนของผู้ทดสอบขึ้นอยู่กับความสามารถ ความชำนาญของผู้ทดสอบ ความแตกต่าง ความสม่ำเสมอของตัวอย่าง และวิธีการทดสอบ โดย Stone และ Sidel (1993) แนะนำให้ใช้ผู้ทดสอบอย่างน้อย 40 คนต่อตัวอย่างสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผู้ทดสอบอย่างน้อย 100 คนสำหรับการทดสอบผู้บริโภคในที่สาธารณะ ส่วนการทดสอบด้วยวิธีการทดสอบผู้บริโภคตามบ้านควรใช้ผู้ทดสอบ 50 -100 คน ซึ่งจำนวนผู้ทดสอบที่มากจะให้ผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือกว่าการทดสอบที่ใช้ผู้ทดสอบน้อย

2.12.4 ขั้นตอนการทดสอบผู้บริโภค (ปราชญ์, 2551)

ผู้ทดสอบสำหรับการทดสอบการยอมรับ เป็นผู้บริโภคผลิตภัณฑ์นั้นๆ เพื่อให้ตรงกับกลุ่มเป้าหมายของผลิตภัณฑ์ โดยพิจารณาจากลักษณะการใช้งานของผลิตภัณฑ์ เพศ อายุ และรายได้ของผู้ทดสอบ เพื่อกำหนดกลุ่มเป้าหมายต่อไป การทดสอบผู้บริโภคมีขั้นตอนต่างๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.12.4.1 บอกวัตถุประสงค์

ต้องบอกวัตถุประสงค์ของการทดสอบอย่างชัดเจน เช่น เพื่อสอบถามเกี่ยวกับการยอมรับ แนวโน้มการขาย ราคาที่ผู้บริโภคยอมจ่าย เป็นต้น

2.12.4.2 วางแผนการทดสอบ

เริ่มจากกำหนดผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมายของผลิตภัณฑ์ จากนั้นวางแผนการทดสอบ โดยพิจารณาจากจำนวนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ จำนวนผู้บริโภค ขนาดของตัวอย่าง สถานที่ทำการทดสอบ และรูปแบบการทดสอบว่าจะใช้การทดสอบวิธีใด เช่น การสัมภาษณ์ หรือการทำแบบสอบถาม

2.12.4.3 ทดสอบแบบสอบถาม

ทำการทดสอบแบบสอบถามที่จะใช้ในการทดสอบเพื่อปรับปรุงแก้ไขแบบสอบถามให้มีความเข้าใจ และชัดเจน

2.12.4.4 ทำการทดสอบผู้บริโภค และเก็บข้อมูล

2.12.4.5 การวิเคราะห์ข้อมูล และแปลผล

2.13 เทคนิคทางสถิติที่ใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์

เทคนิคทางสถิติที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัย เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หลายตัวแปร (Multivariate analysis) มีหลายประเภท ได้แก่ การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis; PCA) และ Partial Least Square Regression (PLS Regression) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.13.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis; PCA)

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติที่อาศัยหลักความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรที่ใช้เป็นข้อมูลองค์ประกอบหลัก (principal component; PC) เป็นการผสมเชิงเส้นตรง (linear combination) ของตัวแปรที่อธิบายการผันแปรของข้อมูลได้มากที่สุดมารวมกลุ่มไว้ในองค์ประกอบเดียวกัน จากนั้นหาการผสมที่สองที่

สามารถอธิบายความผันแปรได้มากที่สุดเป็นอันดับที่สอง โดยที่ไม่สัมพันธ์กับการผสมแรก ทำเช่นนั้นจึงได้องค์ประกอบหลักที่สามารถอธิบายการผันแปรของข้อมูลได้ครบถ้วน ซึ่งองค์ประกอบหลักจะสามารถอธิบาย การผันแปรได้น้อยลงตามลำดับ และทุกองค์ประกอบไม่มีความสัมพันธ์กัน ตัวแปรที่อยู่ในปัจจัยเดียวกันจะมีความสัมพันธ์กันมาก โดยความสัมพันธ์นั้น อาจจะเป็นไปในทิศทางบวก (ไปในทิศทางเดียวกัน) หรือทิศทางลบ (ไปในทิศทางตรงกันข้าม) ก็ได้ (คณาจารย์ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์, 2549)

ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักจะปรากฏค่าต่างๆ ที่สำคัญ ได้แก่ ค่า eigenvalues เป็นค่าที่ได้จากผลรวมกำลังสองของสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบร่วมในแต่ละองค์ประกอบ และค่า factor loading เป็นค่าน้ำหนักของตัวแปรแต่ละตัวที่สามารถอธิบายได้ถึง ความแปรปรวนร่วมระหว่างตัวแปรกับองค์ประกอบนั้นๆ แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการอธิบายลักษณะของตัวแปรในแต่ละองค์ประกอบ หากตัวแปรมีค่า factor loading อยู่ในองค์ประกอบหลักใดสูงที่สุด นั่นคือองค์ประกอบนั้นใช้เป็นตัวแทนในการอธิบายลักษณะของตัวแปรนั้นได้ดีที่สุด (กัลยา, 2546) การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมสำหรับข้อมูลที่มีจำนวนตัวแปรมาก โดยมีประโยชน์ด้านการลดจำนวนตัวแปร จากการรวมตัวแปรหลายๆ ตัวให้อยู่ในองค์ประกอบเดียวกัน เพื่อให้ง่ายต่อการจัดการข้อมูลต่อไป

ในปี 2001 Ordóñez และคณะ ศึกษาความสัมพันธ์ของลักษณะเนื้อสัมผัสกับการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพ่งเฟอร์เตอร์สูตรดั้งเดิมและสูตรลดไขมัน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก พบว่า ลักษณะทางประสาทสัมผัสด้าน hardness gumminess chewiness skin perception และ adhesiveness มีความสัมพันธ์การยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภค โดย PC1 สามารถอธิบายได้ร้อยละ 57 และ PC2 อธิบายได้ร้อยละ 18

ในปี 2007 García และคณะ ศึกษาผลของการเติมเส้นใยอาหารต่อเนื้อสัมผัสและคะแนนความชอบของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกอิมัลชันลดไขมัน โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะเนื้อสัมผัสและคะแนนความชอบด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก พบว่า ผลิตภัณฑ์ไส้กรอกสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ตามลักษณะเนื้อสัมผัส โดย PC1 สามารถอธิบายข้อมูลได้ร้อยละ 52.3 และ PC 2 อธิบายได้ร้อยละ 26 ซึ่ง PC1 จำแนกผลิตภัณฑ์ออกตามค่าลักษณะเนื้อสัมผัสด้าน adhesiveness และ cohesiveness เปรียบเทียบกับค่า springiness และ hardness ขณะที่ PC2 นั้นจะมีความสัมพันธ์กับค่า adhesiveness มากกว่า PC1

2.13.2 Partial Least Square Regression (PLS Regression)

เป็นวิธีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม (response variable, Y-variable) กับตัวแปรต้น (predictor, X-variable) หลายตัว โดยที่ทำการลดจำนวนข้อมูลของตัวแปรต้นด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบให้มีองค์ประกอบน้อยลงเสียก่อนแล้วนำเอาตัวแปรองค์ประกอบใหม่เหล่านั้น (PCs) ไปวิเคราะห์สมการถดถอยต่อไป แต่วิธีการนี้จะเลือกเพียงบาง PCs โดยพยายามใช้ให้น้อยที่สุดและอธิบายความแปรปรวนให้มากที่สุด (อนุวัตร, 2552)

ในปี 2011 Ritthiruangdej และคณะ ศึกษาการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไ้กรอกหนูโดยใช้เทคนิค near-infrared spectroscopy ซึ่งคณะผู้วิจัยใช้เทคนิค PLS regression เพื่อสร้างโมเดลของสมการสำหรับทำนายองค์ประกอบทางเคมีของไ้กรอกที่มีผลต่อวิธีการฟัรที่รทเมนต์ จากการวิเคราะห์ พบว่า ปัจจัยที่มีผลคือ ปริมาณโปรตีน ไขมัน และความชื้น