

ผลของส่วนผสมต่อโครงสร้างทางกายภาพและพันธะเคมีของ
เนื้อเทียมโปรตีนถั่วเหลือง

นางสาวจิรัตน์ ะรินรัมย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2548
ISBN 974-533-486-3

**EFFECT OF INGREDIENTS ON PHYSICAL
STRUCTURE AND CHEMICAL LINKAGES OF
SOY PROTEIN MEAT ANALOG**

Kajirat Rareunrom

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Science in Food Technology

Suranaree University of Technology

Academic Year 2005

ISBN 974-533-486-3

ผลของส่วนผสมต่อลักษณะทางกายภาพและพันธะเคมีของ
เนื้อเทียมโปรตีนถั่วเหลือง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร.กนกอร อินทราพิเชฐ)
ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนันtha ทองทา)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรวัดณ์ ขงสวัสดิกุล)
กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สาวณีษ์ รัตนพานี)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุเวทย์ นิงสานนท์)
คณบดีสำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

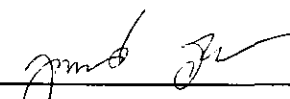
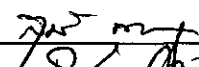

ขจิรัตน์ วรรณรัมย์ : ผลของส่วนผสมต่อโครงสร้างทางกายภาพและพันธะเคมีของเนื้อเทียมโปรตีนถั่วเหลือง (EFFECT OF INGREDIENTS ON PHYSICAL STRUCTURE AND CHEMICAL LINKAGES OF SOY PROTEIN MEAT ANALOG) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.สุนันทา ทองทา, 125 หน้า. ISBN 974-533-486-3

การแปรรูปเนื้อเทียมด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ โดยผสมแป้งถั่วเหลืองพองไขมันกับโปรตีนถั่วเหลืองสกัดในปริมาณ 20, 40, 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษาปริมาณโปรตีนที่ละลายได้พบว่าพันธะไดซัลไฟด์ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจนมีบทบาทสำคัญในการเชื่อมโยงโครงสร้างของโปรตีนในผลิตภัณฑ์ การเพิ่มปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดจาก 20 เป็น 80 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณพันธะดังกล่าวในเนื้อเทียม ($p>0.05$) แต่ส่งผลให้อัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้น ($p<0.05$) ความเครียด และลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางการฉีกได้และความเหนียวของเนื้อเทียมลดลง ($p<0.05$) ลักษณะโครงสร้างภายในของเนื้อเทียมที่เติมโปรตีนถั่วเหลืองสกัดในปริมาณน้อยที่สังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าเนื้อเทียมมีช่องรูพรุนขนาดเล็กและใหญ่ที่มีผนังรูพรุนบางเรียบ และปรากฏริ้วเส้นใยเล็กละเอียด แต่เมื่อปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดในเนื้อเทียมเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดช่องรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น ผนังของรูพรุนหนาไม่ต่อเนื่อง และมีลักษณะเส้นใยลดลง การเติมโพแทสเซียมโบรเมทที่ระดับ 60, 120 และ 180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในส่วนผสมระหว่างแป้งถั่วเหลืองพองไขมัน 80 เปอร์เซ็นต์ และโปรตีนถั่วเหลืองสกัด 20 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เนื้อเทียมมีระดับของพันธะไดซัลไฟด์ และปริมาณหมู่ซัลไฮดริลไม่แตกต่างจากเนื้อเทียมที่ไม่ได้เติมโพแทสเซียมโบรเมท และทำให้เนื้อเทียมมีความเครียด ลักษณะการฉีกได้และความเหนียว และอัตราการขยายตัวไม่แตกต่างจากเนื้อเทียมที่ไม่ได้เติมโพแทสเซียมโบรเมท ($p>0.05$) การเติมแป้งสาลีในระดับ 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์ ทำให้อัตราการขยายตัว และลักษณะการฉีกได้และความเหนียวของเนื้อเทียมเพิ่มขึ้น ($p<0.05$) เนื้อเทียมที่เติมแป้งสาลี 20 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความเครียดสูงสุด ($p<0.05$) เมื่อศึกษาผลขององค์ประกอบของแป้งสาลีต่อการสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียม พบว่าสตาร์ชสาลีมีส่วนทำให้เนื้อเทียมมีอัตราการขยายตัว และลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางการฉีกได้และความเหนียวมากกว่าเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของกลูเตน และเนื้อเทียมโปรตีนถั่วเหลืองสกัด ($p<0.05$)

การเติมแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ในเนื้อเทียม ส่งผลให้พันธะไฮโดรเจน และอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก มีบทบาทสำคัญในการเชื่อมโยงโครงสร้างของ

โปรตีนในผลิตภัณฑ์ การเพิ่มปริมาณแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มจาก 0 เป็น 50 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีผลต่อปริมาณพันธะไฮโดรเจน อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไดซัลไฟด์ ในโครงสร้างโปรตีนของเนื้อเทียม เนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม 0-20 เปอร์เซ็นต์ มีลักษณะการฉีกได้ ความเป็นเส้นใย อัตราการขยายตัว และความสามารถในการกักเก็บน้ำ ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) แต่พบการลดลงของความเครียด และความหนาแน่นจำเพาะ เมื่อส่องดูโครงสร้างภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสแตริโอ พบว่ามีการจัดเรียงตัวของเส้นใยยาวต่อเนื่องและปรากฏช่องรูพรุนขนาดใหญ่ แต่เมื่อปริมาณแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มในเนื้อเทียมเพิ่มเป็น 50 เปอร์เซ็นต์ เนื้อเทียมมีความเครียด และความหนาแน่นจำเพาะเพิ่มขึ้น ($p<0.05$) ไม่ปรากฏโครงสร้างแบบเส้นใย แต่มีเนื้อสัมผัสที่เกาะตัวเชื่อมเป็นเนื้อเดียวกัน จึงทำให้เนื้อเทียมมีลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางการฉีกได้และความเป็นเส้นใยน้อย รวมทั้งมีอัตราการขยายตัว และความสามารถในการกักเก็บน้ำของเนื้อเทียมลดลง ($p<0.05$) ดังนั้นความสมบูรณ์ของโครงสร้างของเนื้อเทียมที่มีแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเพิ่มเป็น 40 เปอร์เซ็นต์ มีค่าลดลง ($p<0.05$)

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร
ปีการศึกษา 2548

ลายมือชื่อนักศึกษา 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม 

KAJIRAT RAREUNROM : EFFECT OF INGREDIENTS ON PHYSICAL
STRUCTURE AND CHEMICAL LINKAGES OF SOY PROTEIN MEAT
ANALOG. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SUNANTA TONGTA,
Ph.D. 125 PP. ISBN 974-533-486-3

MEAT ANALOG/SOY PROTEIN ISOLATE/TEXTURAL APPEARANCE/
PROTEIN SOLUBILITY/POTASSIUM BROMATE/WHEAT FLOUR/FULL FAT
SOY FLOUR

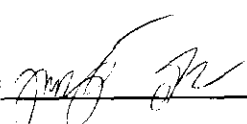
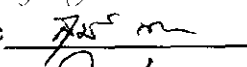

Soy protein meat analog was produced using a twin screw extruder. Different soy protein isolate (SPI) contents of 20, 40, 60 and 80 % were blended with defatted soy flour (DSF). Based on protein solubility studies, disulfide bond, hydrophobic interaction and hydrogen bond were the major linkages stabilizing a meat analog structure. Increasing SPI content from 20 to 80% did not increase these chemical linkages but resulted in an increased expansion ratio ($p < 0.05$). Normal stress was decreased with increasing SPI content. Textural appearance as judged by tearing and fibrous characteristics was reduced with an increased SPI contents. Scanning electron micrographs of meat analog at 20% SPI exhibited small and large pores with thin and smooth cell wall and fine fibrousness. Meat analog containing high soy protein isolate showed large air cells with thick cell wall and less fibrousness. The addition of potassium bromate of 60, 120, and 180 mg/kg in the blend of 80% DSF and 20% SPI resulted that there was no difference in disulfide bond and sulfhydryl group content between meat analog containing potassium bromate and meat analog without potassium bromate. In addition, the expansion ratio, normal stress and tearing and

fibrous characteristics were not increased as increasing potassium bromate content ($p < 0.05$). The addition of wheat flour (20 and 40%) into soy protein meat analog showed an increase in expansion ratio and tearing and fibrous characteristics. Meat analog containing 20% wheat flour showed the highest stress ($p < 0.05$). Meat analog containing wheat starch appeared to show higher expansion ratio and tearing and fibrous characteristics than those containing wheat gluten and SPI ($p < 0.05$).

Meat analog containing 10, 20, 30, 40 and 50% full fat soy flour (FSF) showed that hydrophobic interaction and hydrogen bond were the major linkages stabilizing a meat analog structure. Increasing FSF content from 10 to 50% was not affected on the levels of hydrophobic interaction, hydrogen bond and disulfide bond. Meat analog containing 10 and 20 % FSF showed tearing and fibrous characteristics, expansion ratio and water holding capacity similar to meat analog without FSF but their stresses and bulk densities were lower ($p < 0.05$). The stereo micrographs of meat analog containing low FSF appeared large pores with long and fine fibrous structure. Increasing FSF content to 50% resulted in high stress and bulk density ($p < 0.05$). In addition, the fibrous structure of meat analog disappeared and its texture was coalescence, resulting in less tearing and fibrous characteristics ($p < 0.05$). The decreased structure integrity was obtained in meat analog as increasing FSF content from 0 to 40 % FSF ($p < 0.05$).

School of Food Technology

Academic Year 2004

Student's Signature 
Advisor's Signature 
Co-advisor's Signature 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุ
นันทา ทองทา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ช่วยชี้แนะ ให้ความช่วย
เหลือในการศึกษาวิจัยอย่างดียิ่ง ตลอดจนแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ
สมบูรณ์ กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จิรวัดน์ ยงสวัสดิกุล ที่กรุณาให้คำปรึกษา และ
ตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ กนกอร อินทราพิเชฐ ประธานกรรมการสอบวิทยา
นิพนธ์

ขอขอบคุณ นายวันชัย จอกกระโทก และเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือ 1 และ 3
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่านที่เสียสละเวลาให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวก
แก่ผู้วิจัยด้วยดีมาโดยตลอด ขอขอบคุณ นางสาวปิยมาศ มหาบุญญานนท์ และพี่ๆ เพื่อนๆ และ
น้องๆ ที่ทำงานในห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีอาหารทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และ
ให้กำลังใจตลอดการเรียนที่ผ่านมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณคนในครอบครัวทุกท่าน ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู และให้การ
ศึกษาเป็นอย่างดีตลอดเวลาที่ผ่านมา

ขจีรัตน์ ธรรมย์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย.....	5
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	5
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	6
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.7 รายการอ้างอิง.....	6
2. ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
2.1 ความรู้ทั่วไปของถั่วเหลือง.....	10
2.2 กระบวนการเอกซ์ทราซัน.....	20
2.3 การใช้ประโยชน์จากถั่วเหลือง.....	24
2.4 เนื้อเทียม.....	26
2.5 รายการอ้างอิง.....	40
3. ผลของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดต่อลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของเนื้อเทียม.....	52
3.1 บทคัดย่อ.....	52
3.2 บทนำ.....	52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3	วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ.....	54
3.4	ผลการทดลองและการวิจารณ์.....	59
3.4.1	ผลการศึกษาเบื้องต้น.....	59
3.4.2	ผลของปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดต่อพันธะเคมี.....	59
3.4.3	ผลของปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดต่อลักษณะโครงสร้างภายใน.....	63
3.4.4	ผลของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดต่อลักษณะทางกายภาพ.....	65
3.5	สรุปผลการทดลอง.....	68
3.6	รายการอ้างอิง.....	68
4.	ผลของโพแทสเซียมโบรเมท และแป้งสาลีต่อลักษณะของเนื้อเทียมโปรตีนถั่วเหลือง.....	72
4.1	บทคัดย่อ.....	72
4.2	บทนำ.....	73
4.3	วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ.....	75
4.4	ผลการทดลองและการวิจารณ์.....	79
4.4.1	ผลของโพแทสเซียมโบรเมท.....	79
4.4.2	ผลของแป้งสาลีต่อลักษณะทางกายภาพ.....	84
4.4.3	ผลของโปรตีนกลูเตนสาลี สตาร์ชสาลี และแป้งสาลีต่อลักษณะทางกายภาพ.....	86
4.5	สรุปผลการทดลอง.....	88
4.6	รายการอ้างอิง.....	89
5.	ผลของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มต่อสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และสมบัติเชิงหน้าที่ของเนื้อเทียมโปรตีนถั่วเหลือง.....	96
5.1	บทคัดย่อ.....	96
5.2	บทนำ.....	97
5.3	วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ.....	99
5.4	ผลการทดลองและการวิจารณ์.....	102
5.4.1	ผลของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มต่อพันธะเคมี.....	102

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4.2	ผลของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มต่อลักษณะโครงสร้างและเนื้อสัมผัส.....	105
5.4.3	ผลของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มต่อลักษณะทางกายภาพ และสมบัติเชิงหน้าที่.....	110
5.5	สรุปผลการทดลอง.....	112
5.6	รายการอ้างอิง.....	113
6.	บทสรุป.....	117
	ภาคผนวก.....	119
	ประวัติผู้เขียน.....	125

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ปริมาณโปรตีนและไอโซฟลาโวนส์ในผลิตภัณฑ์ถั่วเหลืองต่างๆ.....19
2.2	องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองและผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ (น้ำหนักแห้ง).....24
2.3	คุณสมบัติเชิงหน้าที่ของผลิตภัณฑ์โปรตีนถั่วเหลืองในอาหาร.....25
3.1	ปริมาณโปรตีนของวัตถุดิบ 4 สูตร ที่มีส่วนผสมของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด 20-80 เปอร์เซ็นต์55
3.2	รูปแบบการจัดเรียงสกรู.....56
3.3	ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ (กรัม/กรัม โปรตีน) ของเนื้อเทียมที่มีโปรตีน ถั่วเหลืองสกัด 20-80 เปอร์เซ็นต์ ในตัวทำละลาย 7 ชนิด.....60
3.4	ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ (กรัม/กรัม โปรตีน) ของวัตถุดิบที่มีโปรตีน ถั่วเหลืองสกัด 20-80 เปอร์เซ็นต์ ในตัวทำละลาย 7 ชนิด.....61
3.5	ตัวแปรของเอกซ์ทรูชันและลักษณะทางกายภาพของเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของ โปรตีนถั่วเหลืองสกัด ในระดับ 20-80 เปอร์เซ็นต์66
4.1	ปริมาณส่วนผสม และโปรตีนทั้งหมดในวัตถุดิบ สำหรับการแปรรูปเนื้อเทียม ที่มีส่วนผสมของแป้งสาลี 0-40 เปอร์เซ็นต์.....77
4.2	ปริมาณส่วนผสม และโปรตีนทั้งหมดในวัตถุดิบสำหรับแปรรูปของเนื้อเทียม ที่มีส่วนผสมของกลูเตนสาลี สตาร์ชสาลี และแป้งสาลี.....77
4.3	ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ (กรัม/กรัม โปรตีน) ของวัตถุดิบและเนื้อเทียมจาก โปรตีนถั่วเหลืองที่เติมโพแทสเซียมโบรเมท 0-180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ใน ตัวทำละลาย 3 ชนิด.....81
4.4	ปริมาณหมู่ซัลไฮดริล (ไมโคร โมล/กรัม โปรตีน) ของวัตถุดิบ (M) และเนื้อเทียม (P) ที่เติมโพแทสเซียมโบรเมท (PB) 0-180 มิลลิกรัมต่อ กิโลกรัม.....82
4.5	ตัวแปรของเอกซ์ทรูชันและลักษณะทางกายภาพของเนื้อเทียมโปรตีนถั่วเหลือง ที่เติมโพแทสเซียมโบรเมท 0-180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม.....83

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.6	ตัวแปรของเอกซ์ทรูชันลักษณะทางกายภาพ และสมบัติเชิงหน้าที่ของเนื้อเทียม โปรตีนถั่วเหลืองที่เติมแป้งสาลี 0-40 เปอร์เซ็นต์.....85
4.7	ตัวแปรของเอกซ์ทรูชันและลักษณะทางกายภาพของเนื้อเทียมโปรตีนถั่วเหลืองที่เติม โปรตีนกลูเตน สตาร์ชสาลี แป้งสาลี และส่วนผสมของกลูเตนและสตาร์ชสาลี.....87
5.1	ปริมาณส่วนผสม โปรตีน และไขมันในวัตถุดิบสำหรับแปรรูปเนื้อเทียม 6 สูตร ที่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม 0-50 เปอร์เซ็นต์.....99
5.2	ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ (กรัม/กรัม โปรตีน) ของเนื้อเทียมที่มี FSF เป็น ส่วนผสมในระดับ 0-50 เปอร์เซ็นต์ ในตัวทำละลาย 5 ชนิด.....103
5.3	ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ (กรัม/กรัม โปรตีน) ของวัตถุดิบที่มี FSF เป็นส่วนผสม ในระดับ 0-50 เปอร์เซ็นต์ ในตัวทำละลาย 5 ชนิด.....103
5.4	เปอร์เซ็นต์โปรตีนที่ละลายได้เพิ่มขึ้นของเนื้อเทียมที่มี FSF เป็นส่วนผสมในระดับ 0-50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเติม ME ใน P+S+U และเติม SDS+Urea ใน P+ME ตามลำดับ.....104
5.5	ตัวแปรของเอกซ์ทรูชัน และลักษณะทางกายภาพของเนื้อเทียมที่มี FSF เป็นส่วนผสม ในระดับ 0-50 เปอร์เซ็นต์110
5.6	ลักษณะทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของเนื้อเทียมที่มี FSF เป็นส่วนผสมใน ระดับ 0-50 เปอร์เซ็นต์111
1 ข.	ระดับการให้คะแนนของตัวอย่างอาหารที่ใช้ในการฝึกฝนผู้ทดสอบ.....123

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	ส่วนประกอบของเมล็ดถั่วเหลือง.....10
2.2	การแยกโปรตีนถั่วเหลืองในส่วนของโปรตีน 7S โกลบูลิน และ 11S โกลบูลิน.....12
2.3	โครงสร้างของไอโซฟลาโวนส์ทั้งสามชนิด.....19
2.4	กลไกของการสูญเสียสภาพดั้งเดิมทางธรรมชาติของโปรตีน.....28
2.5	ปฏิกิริยาออกซิเดชันของหมู่ซัลไฮดริลก่อให้เกิดพันธะไดซัลไฟด์ในโปรตีน.....37
3.1	ภาพถ่ายตามขวางที่กำลังขยาย 17 เท่า (ก, ข, ค, ง) ของเนื้อเทียม ที่เติมโปรตีนถั่วเหลืองสกัด 20, 40, 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ.....64
3.2	ภาพถ่ายตามยาวที่กำลังขยาย 120 เท่า (ก, ข, ค, ง) ของเนื้อเทียม ที่เติมโปรตีนถั่วเหลืองสกัด 20, 40, 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ.....64
5.1	ภาพถ่ายตามขวางที่กำลังขยาย 12 เท่าของเนื้อเทียมที่มีแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม เป็นส่วนผสมที่ระดับ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ (ก, ข, ค, ง, จ, ฉ).....106
5.2	ภาพถ่ายตามยาวที่กำลังขยาย 30 เท่าของเนื้อเทียมที่มีแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม เป็นส่วนผสมที่ระดับ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ (ก, ข, ค, ง, จ, ฉ).....107

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื้อเทียม (meat analog) เป็นผลิตภัณฑ์อาหารจากพืชโดยเฉพาะถั่วเหลืองที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้ในการบริโภคทดแทนเนื้อสัตว์ ซึ่งได้รับความนิยมจากกลุ่มผู้บริโภคมังสวิรัติและกลุ่มผู้บริโภคทั่วไป และจำเป็นสำหรับการพัฒนาเพื่อเพิ่มปริมาณอาหารให้เพียงพอต่อประชากรโลกที่เพิ่มขึ้นทั้งในกลุ่มประเทศกำลังพัฒนาและด้อยพัฒนาซึ่งเป็นกลุ่มประเทศที่ประชากรส่วนใหญ่มีฐานะยากจน (เศรษฐศิลป์ อัมวรรณ และภัทรภรณ์ ศรีสมรรถการ, 2541; อภิพรรณ พุกภักดี, 2546) ถั่วเหลืองจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีพื้นที่การเพาะปลูกทั่วโลก เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันพืช อาหาร และการเลี้ยงสัตว์ โดยสหรัฐอเมริกาเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกถั่วเหลืองเป็นรายใหญ่ของโลก ส่วนปริมาณผลผลิตถั่วเหลืองภายในประเทศไทยมีจำนวนจำกัด ไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ภายในประเทศ ต้องนำเข้าถั่วเหลืองและผลิตภัณฑ์ถั่วเหลืองจากต่างประเทศเป็นจำนวนมาก โดยในปี พ.ศ. 2547 มีมูลค่าการนำเข้าถั่วเหลืองสูงถึง 14,000 ล้านบาท (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2547) จึงจำเป็นที่ภาครัฐจะต้องเข้ามามีบทบาทในการช่วยเหลือเกษตรกรผู้เพาะปลูกถั่วเหลืองให้มีความรู้ความชำนาญ จนกระทั่งสามารถเพิ่มผลผลิตถั่วเหลืองภายในประเทศให้สูงขึ้น เพื่อลดการนำเข้าจากต่างประเทศลง ตลอดจนส่งเสริมการนำถั่วเหลืองไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูง เพื่อจูงใจให้เกษตรกรหันมาเพาะปลูกถั่วเหลืองกันมากขึ้น

ปัจจุบันผลิตภัณฑ์อาหารจากถั่วเหลืองได้รับความนิยมจากกลุ่มผู้บริโภคเป็นอย่างมาก เนื่องจากถั่วเหลืองเป็นแหล่งของโปรตีนที่มีราคาถูกและหาซื้อได้ง่าย มีสารอาหารที่ให้ประโยชน์ต่อร่างกายหลายชนิด ได้แก่ กรดไขมันที่จำเป็นต่อร่างกาย (essential fatty acids) โยอาหาร (dietary fiber) และสารในกลุ่มพฤกษเคมี (phytochemical compounds) เป็นต้น (อาณานิธิธรรมยง และ ประไพศรี ศรีจักรวาล, 2543) ส่งผลให้มีการแปรรูปถั่วเหลืองมาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด ได้แก่ ซอส ซีอิ๊ว นํ้านมถั่วเหลือง และเต้าหู้ เป็นต้น โดยผลิตภัณฑ์อาหารเหล่านี้สามารถนำไปบริโภคได้ทันที (อภิพรรณ พุกภักดี, 2546) ส่วนแบ่งถั่วเหลืองสามารถนำไปเป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ เช่น ผลิตภัณฑ์เนื้อ นม พาสตา เบเกอรี่ เครื่องดื่ม และผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม เป็นต้น แบ่งถั่วเหลืองมีหลายประเภทได้แก่ แบ่งถั่วเหลืองไขมันเต็ม (full fat soy flour: FSF) แบ่งถั่วเหลืองพร่องไขมัน (defatted soy flour: DSF) โปรตีนถั่วเหลือง

เข้มข้น (soy protein concentrate: SPC) และ โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (soy protein isolate: SPI) เป็นต้น โดยแปรรูปถั่วเหลืองส่วนใหญ่ได้นำเข้ามาจากต่างประเทศ มีเพียง FSF เท่านั้นที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศไทย เนื่องจากกรรมวิธีการแปรรูป FSF มีขั้นตอนเรียบง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน จึงสามารถทำเป็นอุตสาหกรรมในครัวเรือนและชุมชนได้ โดยการให้ความร้อนแก่เมล็ดถั่วเหลือง แล้วนำไปบดและร่อน จนได้ FSF ที่มีไขมันมากถึงร้อยละ 20 จึงให้พลังงานสูง ทั้งยังประกอบด้วยกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัว และไม่มีคอเรสเตอรอล ทั้งยังมีสมบัติเชิงหน้าที่ที่ดี จึงได้นำไปเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อาหารพวกเบเกอรี่และเครื่องดื่มต่างๆ (ประเสริฐ สายสิทธิ์ และคณะ, 2527; Tanteeratararm, 1993)

ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่มีวางจำหน่ายในท้องตลาดนั้น มีทั้งที่ผลิตจากโรงงานอุตสาหกรรมและผลิตกันเองภายในครัวเรือน ผู้บริโภคสามารถผลิตเนื้อเทียมได้ โดยผสม DSF กากเตน และน้ำ นวดให้เข้ากัน ปั้นเป็นก้อน นำไปนึ่งและตากแดดจนแห้ง เสร็จแล้วสามารถนำไปประกอบอาหารได้ (สมชาย ประภาวัต, 2534) โดยเนื้อเทียมที่ได้จะมีเนื้อสัมผัสไม่เหมือนเนื้อสัตว์มากนัก ดังนั้นจึงมีการริเริ่มพัฒนาการแปรรูปเนื้อเทียมในเชิงอุตสาหกรรม ด้วยการนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยและเครื่องจักรกลเข้ามามีบทบาทในผลิตเนื้อเทียมมากขึ้น เช่น การสร้างเส้นใยในสารละลายกรดและด่างสูง (fiber spinning) กระบวนการอัดพอง (extrusion) การสร้างเนื้อสัมผัสด้วยไอน้ำ (steam texturization) และการสร้างเนื้อสัมผัสด้วยการกดอัด (press texturization) เป็นต้น โดยกระบวนการอัดพองหรือเอกซ์ทรูชันเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในการแปรรูปเนื้อเทียมมากที่สุด เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่นำขั้นตอนการนวดผสม การให้ความร้อนและการสร้างรูปร่างมารวมไว้ด้วยกัน จึงประหยัดเวลาและแรงงาน ให้ผลผลิตสูง มีต้นทุนในการผลิตต่ำ ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่ได้มีคุณภาพดีและมีความสม่ำเสมอ ทั้งยังมีคุณลักษณะคล้ายเนื้อสัตว์มาก (Harper, 1981) วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตเนื้อเทียมด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ได้แก่ DSF และ SPC โดยได้นำ SPI มาช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงหน้าที่ของเนื้อเทียมให้ดีขึ้นอีกด้วย (Maurice and Stanley, 1978; Sheard, Ledward, and Mitchell, 1984) ส่วนงานวิจัยที่นำ FSF มาเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเนื้อเทียมยังมีอยู่น้อย เนื่องจากไขมันที่มีอยู่นั้นกระทำตัวเป็นสารหล่อลื่น ทำให้วัตถุดิบไหลผ่านสกรูและบาร์เรล ออกมาในระยะเวลาสั้นด้วยความดันต่ำ ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่ได้จึงไม่มีลักษณะโครงสร้างแบบเส้นใยคล้ายเนื้อสัตว์ (Gwiazada, Noguchi, and Saio, 1987; Bhattacharya and Hanna, 1988) แต่อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของ FSF นอกจากจะให้ลักษณะเนื้อสัมผัส ลักษณะปรากฏ และความรู้สึกในปากคล้ายกับเนื้อสัตว์แล้ว ยังให้ความนุ่ม ชุ่มฉ่ำและความเลี่ยนมันซึ่งเป็นลักษณะเด่นของเนื้อสัตว์อีกด้วย (Guy, 1994) ซึ่งอาจทำให้เนื้อเทียมได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคมากยิ่งขึ้น

การปรับปรุงคุณภาพของเนื้อเทียมให้มีลักษณะตรงตามความต้องการของผู้บริโภคนั้นได้มีการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาขึ้นมาโดยตลอด โดยการปรับปรุงกระบวนการแปรรูปและการพัฒนาอุปกรณ์เพิ่มเติมให้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (Wenger, Osterhaus, and Smith, 1975; Sakata, Otsubo, Kugitani, Baba, and Hirotsuka, 1999; Ha, 1992) รวมทั้งการนำวัตถุดิบและสารเติมแต่งอื่นๆ มาช่วยปรับปรุงคุณภาพของเนื้อเทียม (Atkinson, 1970; Boison, Toranto and Cheryan, 1983; Kearns, Rokey, and Huber, 1989; Moore, 1994) จากงานวิจัยของ Rhee, Kuo และ Lusas (1981) พบว่าเนื้อเทียมจาก DSF ที่มีส่วนผสมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.01 และ 0.05 เปอร์เซ็นต์ ที่แปรรูปด้วยเครื่องสร้างเนื้อสัมผัสด้วยการกดอัด (hand press texturizer) ที่ความชื้น 25 เปอร์เซ็นต์ ได้เนื้อเทียมที่มีรูปร่างแบบแท่ง ไม่พองตัว ผิวหน้าหยาบ มีความเครียดและโครงสร้างแบบเส้นใยน้อย ในขณะที่เดิมสารที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ เช่น ซิสเตอีน ประมาณ 0.1-0.5 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ความหนาแน่นจำเพาะของเอกซ์ทรูเดตจากโปรตีนถั่วเหลืองลดลง แต่มีความสามารถในการกักเก็บน้ำเพิ่มขึ้น แต่ Li และ Lee (1996b, 1998) รายงานว่าการเติมซิสเตอีน 0.25-1.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นสารรีดิวซ์ในแป้งสาลีเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการทำเอกซ์ทรูชัน ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีอัตราการขยายตัวและความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง ผลิตภัณฑ์มีขนาดของรูพรุนลดลง รวมทั้งมีผนังรูพรุนบางลง อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานการใช้โพแทสเซียมโบรเมต ซึ่งเป็นสารออกซิไดซิ่งในกระบวนการเอกซ์ทรูชันของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง ทั้งนี้การเติมโพแทสเซียมโบรเมตในวัตถุดิบเพื่อใช้ในการแปรรูปเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง อาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธะไดซัลไฟด์ของโครงสร้างโปรตีน ซึ่งอาจทำให้เนื้อเทียมมีเนื้อสัมผัสที่แข็งแรงขึ้น เนื่องจากมีรายงานเบื้องต้นว่าพันธะไดซัลไฟด์เป็นพันธะที่มีบทบาทต่อโครงสร้างของโปรตีนในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด เช่น ขนมปัง เต้าหู้ และเนื้อเทียม เป็นต้น (Kohman et al., 1915; Sheard et al., 1984) โดยเห็นได้อย่างชัดเจนในการทำผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ที่ได้นำสารออกซิไดซิ่งและสารรีดิวซ์มาใช้เป็นส่วนผสมร่วมกับแป้งสาลีที่เป็นส่วนผสมหลัก ซึ่งมีส่วนปรับปรุงลักษณะของผลิตภัณฑ์ได้อย่างชัดเจน

นอกจากนี้การเติมโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตจากแหล่งอื่นๆ ที่นอกเหนือจากถั่วเหลืองสามารถช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสและสมบัติเชิงหน้าที่ของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองได้ Lin, Huff และ Hsieh (2000, 2002) เติมสตาร์ชสาลี 10 เปอร์เซ็นต์ ใน SPI ก่อนนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่ความชื้นสูง 60 เปอร์เซ็นต์ได้เนื้อเทียมที่มีเนื้อสัมผัสแน่นเหนียว และมีโครงสร้างแบบเส้นใยคล้ายเนื้อสัตว์มาก และจากงานวิจัยของ วิษณุศา จันทพรชัย, เพ็ญขวัญ ชมปรีดา และวิชัย หลุทัยธนาสันต์ (2537) พบว่าปริมาณของกลูเตนสาลีใน

อัตรา 40 เปอร์เซ็นต์ เป็นระดับที่เหมาะสมที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตเนื้อเทียมจาก DSF ทำให้ได้เนื้อเทียมที่มีความแข็งแรงและมีคุณภาพดีขึ้น แสดงว่าการเติมวัตถุดิบต่างๆเหล่านี้ในเนื้อเทียมอาจมีส่วนช่วยปรับปรุงสมบัติทางการไหลของโคเนื้อเทียมในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน แต่ทั้งนี้ยังไม่มียานวิจัยที่นำแป้งสาลี (wheat flour) มาเป็นส่วนผสมในการแปรรูปเนื้อเทียมร่วมกับโปรตีนจากถั่วเหลือง ซึ่งการนำแป้งสาลีมาใช้นอกจากอาจมีส่วนช่วยปรับปรุงคุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัสและสมบัติเชิงหน้าที่ของเนื้อเทียมโปรตีนถั่วเหลืองแล้ว ยังช่วยปรับปรุงคุณค่าทางสารอาหารของโปรตีนให้ทัดเทียมโปรตีนจากเนื้อสัตว์ได้ รวมทั้งการที่แป้งสาลีมีราคาถูกกว่า DSF และ SPI จึงอาจทำให้เนื้อเทียมมีราคาถูกลงได้

การแปรรูปเนื้อเทียมจาก FSF ได้รับความสนใจในการศึกษาและพัฒนาจากนักวิจัยหลายท่าน (Gwiazada et al., 1987; Nelson and Leigh, 1983) จากการศึกษาของสมชาย ประภาวัต (2532) ที่ได้ผลิตเนื้อเทียมหรือโปรตีนเกษตรจาก FSF ด้วยเครื่องวิลเลจเทคเจอร์ไรเซอร์ (village texturizer) พบว่าเนื้อเทียมที่ผลิตที่ความชื้นสูง 45 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิสูง 200-210 องศาเซลเซียส ได้รับการยอมรับของผู้ทดสอบทางด้านกรพองตัว สี รูปร่างของผลิตภัณฑ์ และความชอบต่ำกว่าโปรตีนเกษตรที่ผลิตที่ความชื้นต่ำประมาณ 35-40 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิต่ำ 160-190 องศาเซลเซียส ส่วนผลการทดลองของ Hayakawa (1992) พบว่าเนื้อเทียมที่ทำจาก FSF ที่มีไขมันอยู่ 25 เปอร์เซ็นต์ ด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ มีลักษณะโครงสร้างและเนื้อสัมผัสที่ดี แต่พบว่ามีช่องว่างขนาดใหญ่และมีไขมันเป็นส่วนประกอบของผนังของช่องว่างนั้น ซึ่งทำให้ความแน่นเนื้อของเนื้อสัมผัสลดลง จึงเป็นไปได้ว่าไขมันอาจขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของโปรตีน จึงทำให้โครงสร้างเนื้อเทียมอ่อนตัว มีเนื้อสัมผัสหวมไม่แน่น พองตัวน้อยและมีความสามารถในการเก็บกักน้ำต่ำ (Bhattacharya and Hanna, 1988) เมื่อ Horvath และ Czukor (1993) ทำการเอกซ์ทรูวัตถุดิบที่มีส่วนผสมของ FSF ที่อุณหภูมิและความชื้นสูง พบว่ามีไขมันอิสระแยกตัวออกมาจากเอกซ์ทรูเดต จึงจำเป็นต้องเพิ่มพลังงานในการเนียนและอุณหภูมิในการแปรรูปให้สูงขึ้น เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพที่ดีตรงตามความต้องการสูง และมีการเสียไขมันน้อยที่สุด (Kearns et al., 1989; Pilli et al., 2004) จากรายงานผลการศึกษาที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่ามีผู้สนใจศึกษาการเอกซ์ทรูชันผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมของ FSF เป็นจำนวนมาก ซึ่งอาจเป็นผลจากการที่เนื้อเทียมที่มีไขมันเป็นองค์ประกอบนั้น สามารถสร้างเนื้อสัมผัส ลักษณะปรากฏ และความรู้สึกในปากที่มีลักษณะนุ่ม ชุ่มฉ่ำและความเหนียวคล้ายกับเนื้อสัตว์ โดยที่เนื้อเทียมยังคงมีสารอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย และให้พลังงานสูงเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อเทียมชนิดอื่นๆ รวมทั้งการที่ FSF มีราคาถูกเพราะสามารถผลิตได้ภายใน

ประเทศ จึงทำให้เนื้อเทียมมีราคาถูกลงได้ ซึ่งสามารถช่วยลดการนำเข้าของแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมันและโปรตีนถั่วเหลืองสกัดจากต่างประเทศ

ดังนั้นการนำ SPI โพลีแซตเชียมโบรเมท แป้งสาลี และ FSF มาเป็นส่วนผสมร่วมกับ DSF ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการแปรรูปเนื้อเทียมด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันนั้น อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการเชื่อมโยงโครงสร้างทางเคมี และการจัดเรียงตัวของโครงสร้างภายใน ที่อาจมีส่วนช่วยปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสและสมบัติเชิงหน้าที่ของเนื้อเทียมให้ดีขึ้น จนสามารถนำเนื้อเทียมเหล่านี้ไปจัดจำหน่ายในท้องตลาดได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางเนื้อสัมผัส โครงสร้างภายใน และพันธะเคมีของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองที่มีปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดต่างกัน

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของโพลีแซตเชียมโบรเมท และแป้งสาลีต่อการปรับปรุงลักษณะเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง

1.2.3 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางเนื้อสัมผัส พันธะทางเคมี และโครงสร้างภายในของเนื้อเทียมที่เติมแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มในระดับต่างๆ

1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย

1.3.1 ระดับของโปรตีนในวัตถุดิบ มีผลต่อลักษณะทางกายภาพ ลักษณะทางเคมี และโครงสร้างภายในของเนื้อเทียม

1.3.2 โพลีแซตเชียมโบรเมท และแป้งสาลี มีส่วนช่วยปรับปรุงคุณลักษณะของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองให้ดีขึ้น

1.3.3 ระดับของไขมันในวัตถุดิบ มีผลต่อลักษณะทางกายภาพ ลักษณะทางเคมี และสมบัติเชิงหน้าที่ของเนื้อเทียม

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่นำมาใช้ในการทดลอง เป็นแบบสกรูคู่ มีลักษณะของสกรูทั้งสองหมุนตามกันและซ้อนกัน (corotating and intermeshing twin screw extruder)

1.4.2 แป้งสาลีและแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเป็นชนิดที่ผลิตภายในประเทศไทย และมีวางจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาด

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด โปแทสเซียมโบรเมท แป้งสาลี และแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มที่มีต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์ ทั้งทางลักษณะทางกายภาพ และทางพันธะเคมีของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง ที่มีส่วนผสมหลักเป็นแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมันและแปรรูปเนื้อเทียมด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ทำให้ทราบถึงผลกระทบขององค์ประกอบโปรตีน โปแทสเซียมโบรเมท แป้งสาลี และไขมัน ที่มีต่อโครงสร้างภายใน ลักษณะทางกายภาพ เนื้อสัมผัส และพันธะเคมีของผลิตภัณฑ์

1.6.2 เป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าของผลผลิตทางการเกษตรภายในประเทศ เพื่อจูงใจให้เกษตรกรหันมาปลูกและพัฒนาวิธีการปลูกถั่วเหลืองและข้าวสาลีให้มีผลผลิตมากขึ้น

1.7 รายการอ้างอิง

ประเสริฐ สายสิทธิ์ และคณะผู้ช่วยจากสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร. (2527). ถั่วเหลืองและการใช้ประโยชน์ในประเทศไทย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. สยามออฟเซ็ท: กรุงเทพมหานคร.

วิษฐิตา จันทพรชัย, เพ็ญขวัญ ชมปรีดา และวิชัย หฤทัยธนาสันต์. (2537). การพัฒนาผลิตภัณฑ์จากโปรตีนถั่วลิสงแปลงเนื้อสัมผัส. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพมหานคร. (การประชุมวิชาการครั้งที่ 3, 3-5 กุมภาพันธ์ 2537).

เศรษฐศิลป์ อัมมวรธนัน และภัทรภรณ์ ศรีสมรรถการ. (2541). การใช้โปรตีนจากถั่วเหลืองในการผลิตอาหารสุภาพเลียนแบบเนื้อสัตว์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพมหานคร. (รายงานการประชุมเชิงวิชาการถั่วเหลืองแห่งชาติครั้งที่ 7, 25-27 ส.ค. 2541.)

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. ศูนย์สารสนเทศการเกษตร. (2547). สถิติการค้าสินค้าเกษตรกรรมไทยกับต่างประเทศ ปี พ.ศ. 2546. เอกสารทางสถิติ การเกษตรเล่มที่ 404. กรุงเทพมหานคร.

สมชาย ประภาวัต. (2532). ผลของความชื้นของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มและอุณหภูมิของเครื่องวิลเลจเทคเจอร์ไรเซอร์ต่อการทำเกษตรโปรตีน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพมหานคร. (การประชุมทางวิชาการของครั้งที่ 27, 30 มกราคม 2532)

สมชาย ประภาวัต. 2534. การทำเนื้อเทียมจากถั่วเหลือง. อาหาร. 21: 161-171.

- อภิพรธ พุกภักดี. (2546). **ถั่วเหลือง: พืชทองของไทย**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพมหานคร.
- อาณัติ นิธิธรรมยง และ ประไพศรี ศิริจักรวาล. (2543). การฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการเรื่อง “นมถั่วเหลืองและผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม”. สถาบันวิจัยโภชนาการ. มหาวิทยาลัยมหิดล: กรุงเทพมหานคร.
- Atkinson, W.T. (1970). **Meat-like protein food product**. U.S. Patent. 3,488,770.
- Bhattacharya, M. and Hanna, M.A. (1988). Effect of lipid on the properties of extruded product. **J. Food Sci.** 53: 1230-1231.
- Boison, G., Taranto, M.V. and Cheryan, M. (1983). Extrusion of defatted soy flour-hydrocolloid mixtures: Effect of operating parameters of selected textural and physical properties. **J. Food Technol.** 18: 719-730.
- Gwiazada, S., Noguchi, A. and Saio, K. (1987). Microstructural studies of texturized vegetable protein products: Effect of oil addition and transformation of raw material in various sections of a twin screw extruder. **Food Micro.** 6: 57-61.
- Guy, R. C. E. (1994). Raw material for extrusion cooking processes. In N.D. Frame (ed.), **The technology of extrusion cooking**. pp.52-72. American Association of Cereal Chemists: St. Paul, MN, USA.
- Ha, T.T. (1995). **Texturization of low-fat extruded / expelled soy flour by twin-screw extruder**. M.S. Thesis. Food Science. University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.
- Harper, J.M. (1981). **Extrusion of food V.II**. CRC Press: Florida, USA.
- Hayakawa, I. (1992). **Food processing by ultra high pressure twin screw extrusion**. Technomic Publishing: Pennsylvania, USA.

- Horvath, E. and Czukur, B. (1993). Effect of extrusion temperature and initial moisture content on protein solubility and distribution in full fat soybean. **Acta Alimentaria**. 22: 151-154.
- Kearns, J.P., Rokey, G.J. and Huber, G.R. (1989). Extrusion of texturized protein. In Applewhite, T.H. (ed.), **Proceedings of the world congress on vegetable protein utilization in human foods and animal feedstuffs**. American Association of Cereal Chemists: Champaign, IL, USA.
- Kohman, H.A., Hoffman, C. and Godfreg, T.M. (1915). **Manufacture of bread**. U.S. Patent. 1,148,328.
- Li, M. and Lee, T.C. (1996b). Effect of cysteine on the functional properties and microstructure of wheat flour extrudates. **J. of Agric. Food Chem.** 44: 1871-1880.
- Li, M. and Lee, T.C. (1998). Effect of cysteine on the molecular weight distribution and disulfide cross-link of wheat flour proteins in extrudates. **J. of Agric. Food Chem.** 46: 846-853.
- Lin, S., Huff, H.E. and Hsieh, F. (2000). Texture and chemical characteristics of soy protein meat analog extruded at high moisture. **J. of Agric. Food Chem.** 65(2): 264-269.
- Lin, S., Huff, H.E. and Hsieh, F. (2002). Extrusion process parameters, sensory characteristics, and structural properties of high moisture soy protein meat analog. **J. Food Sci.** 67(3): 1066-1072.
- Maurice, T.J. and Stanley, D.W. (1978). Texture-structure relationships in texturized soy protein IV Influence of process variables on extrusion texturization. **J. Ints. Can. Sci. Technol. Aliment.** 11: 1-6.

- Moore, G. (1994). Snack food extrusion. In N.D. Frame (ed), **The technology of extrusion cooking**. pp.111-143. American Association of Cereal Chemists: St. Paul, MN, USA.
- Nelson, A. I. and Leigh, J. S. (1983). **Extrusion texturization of full-fat soybean and product thereof**. U.S. Patent. 4,369,195.
- Pilli, T.D., Severini, C., Baiano, A., Derossi, A., Anhaliass, A. and Legrand, J. (2004). Effect of operating conditions on oil loss and properties of products obtained by co-rotating twin-screw extrusion of fatty meal: preliminary study. **J. of Food Eng.** Article in press.
- Rhee, K.C., Kuo, C.K. and Lusas, E.W. (1981). Texturization. In J.P. Cherry. (ed.), **Protein functionality in food**. American Chemistry Society: Washington DC, USA.
- Sakata, T., Otsubo, N., Kugitani, H., Baba, N. and Hirotsuka, M. (1999). **Process for preparing textured soybean protein**. U.S. Patent. 5,858,448.
- Sheard, P.R., Ledward, D.A. and Mitchell, J.R. (1984). Role of carbohydrates in soya extrusion. **J. Food Tech.** 19: 475-483.
- Tanteeratarm, K. (1993). **Soybean processing for food uses**. College of Agriculture. University of Illinois at Urbana-Champaign. Illinois, USA.
- Wenger, L. V. G., Osterhaus, E. J. and Smith, O. B. (1975). **Method of preparing dense, uniformly layered protein meat analogue**. U.S. Patent. 3,970,761.

บทที่ 2

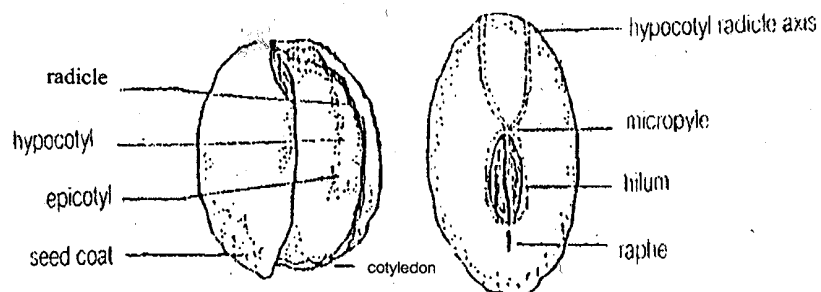
ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปของถั่วเหลือง

ถั่วเหลืองจัดเป็นพืชที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย เป็นพืชที่ปลูกได้ง่าย และขึ้นได้ในแทบทุกพื้นที่ของประเทศ มีถิ่นกำเนิดในเขตตอนบนของประเทศจีน ถั่วเหลืองมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Glycine max.* (L.) Merrill เป็นพืชที่จัดอยู่ในระหว่างกลุ่มของพืชตระกูลถั่ว (legumes) และพืชน้ำมัน (oilseeds) เป็นที่รู้จักของต่างประเทศในนามของ soya bean หรือ soybean สำหรับคนไทยนั้นเรียกกันว่า ถั่วเหลือง ถั่วพระเหลือง หรือถั่วแระ เป็นต้น (คมสัน หุตะแพทย์ และวาริ ยินดีชาติ, 2542)

2.1.1 โครงสร้างของเมล็ดถั่วเหลือง (อภิพรหม พุกภักดี, 2546; Wijeratne, 1993)

เมล็ดถั่วเหลืองบรรจุในฝักได้ประมาณ 3 เมล็ด เมล็ดถั่วเหลืองมีลักษณะกลมรีคล้ายไต และมีรูปร่างแตกต่างกันตามสายพันธุ์และสภาวะการเพาะปลูก เมล็ดถั่วเหลืองมีน้ำหนักโดยประมาณ 120 -180 มิลลิกรัม เมล็ดถั่วเหลืองส่วนใหญ่มีสีเหลืองฟาง มองจากภายนอกเมล็ดเห็นรอยแผลเป็น เรียกว่า ตาหรือขั้วเมล็ด (hilum) ซึ่งเป็นจุดที่เมล็ดติดกับฝักและมีรูเล็กๆ ที่เป็นจุดที่เชื้อตัวผู้เข้าผสมกับไข่เรียกว่า micropyle ถัดไปเป็นรอยงอกของ hypocotyl-radicle axis ปลายอีกด้านหนึ่งของ hilum เป็นร่องเล็กๆ ที่เรียกว่า raphe ขยายยาวไปถึง chalaza ซึ่งเป็นจุดที่ integument ติดกับ ovule ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ส่วนประกอบของเมล็ดถั่วเหลือง

แหล่งที่มา: อภิพรหม พุกภักดี (2546)

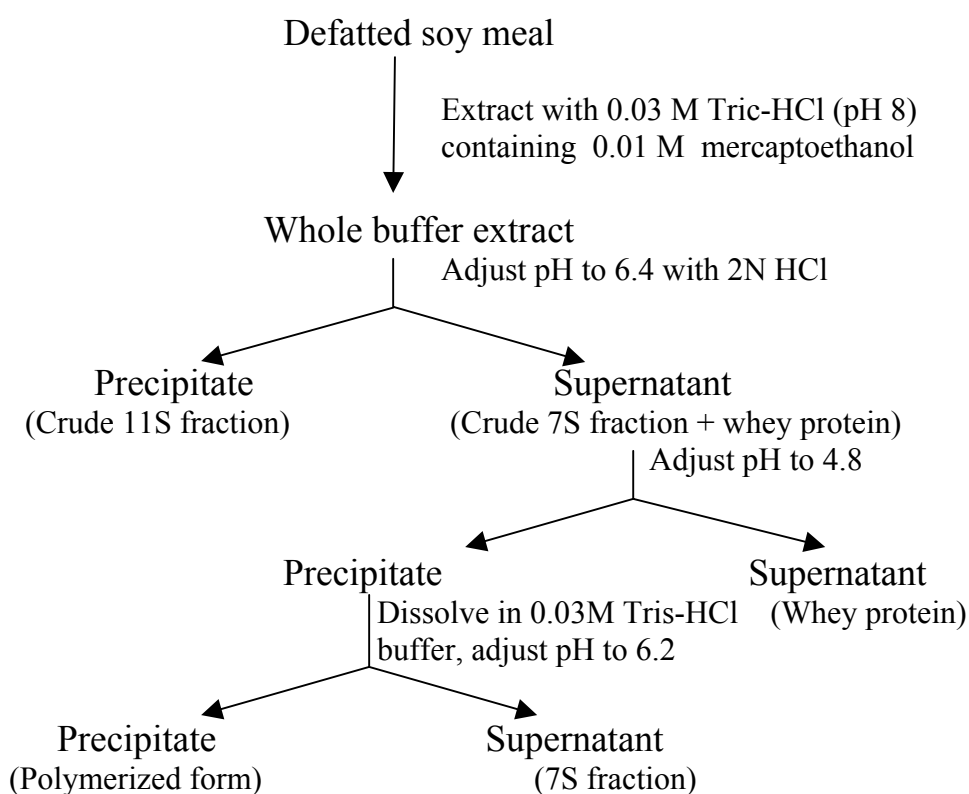
เมล็ดถั่วเหลืองประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ เปลือกเมล็ด (seed coat) ต้นอ่อน (embryo) และเนื้อเยื่อที่สะสมอาหาร (storage tissue) เปลือกเมล็ดนั้นเป็นส่วนนอกสุด ทำหน้าที่ห่อหุ้มส่วนประกอบภายใน ให้คงรูปเป็นเมล็ดป้องกันอันตรายให้กับส่วนที่อยู่ภายใน เช่น ใบเลี้ยงและต้นอ่อน มิให้ถูกทำลายโดยเชื้อราและเชื้อแบคทีเรีย ส่วนที่สองเป็นส่วนที่มีความสำคัญอย่างยิ่งของเมล็ดถั่วเหลือง ได้แก่ ต้นอ่อน ประกอบไปด้วย 3 ส่วนที่สำคัญได้แก่ epicotyl, hypocotyl และ radicle โดย radicle นั้นเป็นส่วนที่เจริญเติบโตไปเป็นราก hypocotyl สามารถยืดตัวออกเมื่อเมล็ดงอกทำหน้าที่ชูใบเลี้ยงขึ้นเหนือผิวดิน สำหรับ epicotyl กลายเป็นส่วนแรกของลำต้นและประกอบไปด้วยจุดเจริญ (growing point) ที่สามารถเจริญเติบโตไปเป็นต้นถั่วเหลืองในภายหลัง ส่วนต่างๆ ของต้นอ่อนที่ได้กล่าวมาแล้วทั้งหมดนี้อยู่ภายใต้เปลือกเมล็ดในตำแหน่งใต้ตาของเมล็ด ส่วนที่สามเป็นเนื้อเยื่อที่สะสมอาหารเรียกว่าใบเลี้ยง (cotyledons) ทำหน้าที่เก็บและจ่ายอาหาร ตลอดจนผลิตเอ็นไซม์ต่างๆ ให้แก่ต้นอ่อน นอกจากนี้ในระหว่างหนึ่งสัปดาห์แรกของการเจริญเติบโต อาหารที่ใบเลี้ยงให้แก่ต้นอ่อนในระยะที่พืชเริ่มงอกได้จากอาหารเดิมที่เมล็ดเก็บไว้และจากการปรุงอาหารของใบเลี้ยงอีกด้วย

2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของถั่วเหลือง

ถั่วเหลืองเป็นอาหารที่อุดมไปด้วยสารอาหารที่มีคุณค่า มีโปรตีน ไขมัน และใยอาหารสูง รวมทั้งมีวิตามิน แร่ธาตุ และกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกาย (คักนางค์ ทองสุก, 2542; อภิพรธณ พุกภักดี, 2546) แต่ทั้งนี้ถั่วเหลืองมีกรดอะมิโนที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ เมธไทโอนีน (methionine) และ ซิสเทอีน (cysteine) ในปริมาณที่จำกัด ทำให้ถั่วเหลืองมีคุณภาพของโปรตีนด้อยกว่าโปรตีนจากเนื้อสัตว์เล็กน้อย แต่เมื่อรับประทานข้าวหรือธัญชาติและอาหารอื่นๆ ร่วมกับผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองแล้ว สามารถช่วยเสริมคุณภาพของโปรตีนให้เท่าเทียมกับโปรตีนจากสัตว์ได้ (ประเสริฐ สายสิทธิ์ และคณะ, 2527) นอกจากนี้ยังพบว่าถั่วเหลืองมีองค์ประกอบพวกพฤษเคมีที่มีส่วนช่วยป้องกันและรักษาโรค ได้แก่ สารเลซิทินช่วยเสริมประสาทและบำรุงต่อมไร้ท่อ ซาโปนินช่วยควบคุมปริมาณโคเลสเตอรอลและเป็นสารต่อต้านการเกิดมะเร็ง (คักนางค์ ทองสุก, 2542) ไอโซฟลาโวนส์ที่มีส่วนช่วยในการลดความเสี่ยงของโรคต่างๆ ได้แก่ โรคหัวใจ โรคมะเร็ง และช่วยป้องกันโรคกระดูกพรุน (Mahungu, Diaz-Mercado, Schwenk, Singletary, and Faller, 1999) ทั้งยังมีส่วนช่วยป้องกันโรคอ่อนเพลีย ลูคีเมีย และมะเร็งผิวหนังได้ (คมสัน หุตะแพทย์ และวาริ ยินดีชาติ, 2542)

2.1.2.1 โปรตีน

ถั่วเหลืองมีโปรตีน 35 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ โปรตีนที่เกี่ยวข้องของกับกระบวนการเมแทบอลิซึม (metabolic protein) และโปรตีนที่ถูกเก็บสะสม (storage protein) โดยโปรตีนที่ถูกเก็บสะสมไว้จัดเป็นโปรตีนที่มีบทบาทสำคัญที่สุดในกลุ่มของโปรตีนถั่วเหลือง และสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ตามขนาดของโมเลกุลโดยอาศัยหลักการตกตะกอน (sedimentation velocity) ได้แก่ โปรตีนที่มีลักษณะก้อนกลม (globular protein) ชนิด 7S และ 11S มีปริมาณรวมกันเป็น 65-80 เปอร์เซ็นต์ของโปรตีนทั้งหมดในเมล็ดถั่วเหลือง (Liu, 1997) และสามารถแยกออกจากแป้งถั่วเหลืองได้ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 การแยกโปรตีนถั่วเหลืองในส่วนของโปรตีน 7S โกลบูลิน และ 11S โกลบูลิน
แหล่งที่มา: Liu (1997)

โครงสร้างพื้นฐานของโปรตีนทั่วไปเกิดจากเชื่อมโยงกันด้วยพันธะเปปไทด์ (peptide) ของกรดอะมิโนชนิดต่างๆ 20 ชนิด เกิดเป็นโครงสร้างของโปรตีนปฐมภูมิ ส่วนโครงสร้างทุติยภูมิ ตติยภูมิ และจตุรภูมิ เชื่อมโยงกันด้วยพันธะทางเคมี ได้แก่ แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic interaction) พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding) พันธะได-

ซัลไฟด์ (disulfide linkages) และอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก (hydrophobic interaction) ตามชนิดของโปรตีน (จิรวัดน์ ยงสวัสดิกุล, 2541) โปรตีน 7S โกลบูลินของถั่วเหลือง ประกอบด้วยคอนไกลิซีนินแบบแอลฟา, เบต้า และแกมมา (α -, β - and γ -conglycinins) โดยที่คอนไกลิซีนินชนิดเบต้ามีส่วนสูงที่สุด ทำให้ได้รับความสนใจในการศึกษามากกว่าโปรตีนชนิดอื่นๆ คอนไกลิซีนินชนิดเบต้ามีลักษณะโครงสร้างของโมเลกุลเป็นแบบสามหน่วยย่อย (trimer) ที่มีขนาดโมเลกุลประมาณ 180 กิโลดาลตัน (kDa) มีองค์ประกอบย่อยเป็น แอลฟา-พลาสม, แอลฟา และเบต้า (α , α and β) ที่มีขนาดโมเลกุลประมาณ 57, 57 และ 42 กิโลดาลตัน ตามลำดับ สามารถแยกหน่วยย่อยออกจากกันด้วย ยูเรีย (urea) หรือ โซเดียม โดเดซิล ซัลเฟต (sodium dodecyl sulfate) และมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบ 4 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ โปรตีน 11S โกลบูลิน เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ไกลิซีนิน (glycinin) จัดเป็นโปรตีนที่บริสุทธิ์และมีปริมาณมากที่สุด 25-35 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของโปรตีนทั้งหมดในเมล็ด และเป็น 40-45 เปอร์เซ็นต์ ของโปรตีนแบบก้อนกลม โครงสร้างของไกลิซีนินเป็นแบบหกหน่วยย่อย (hexamer) มีรูปแบบโครงสร้างหน่วยย่อยเป็น A-S-S-B โดยสัญลักษณ์ A แทนโพลีเปปไทด์ที่มีความเป็นกรด และมีขนาดโมเลกุลประมาณ 34-44 กิโลดาลตัน สัญลักษณ์ B แทนโพลีเปปไทด์ที่มีความเป็นด่าง และมีขนาดโมเลกุลประมาณ 20 กิโลดาลตัน โดยที่สัญลักษณ์ S-S แสดงถึงพันธะไดซัลไฟด์ที่เชื่อมโยงโพลีเปปไทด์ทั้งสองเข้าด้วยกัน ทำให้ไกลิซีนินมีขนาดโมเลกุลประมาณ 560 กิโลดาลตัน สามารถแยกสายโพลีเปปไทด์ได้ด้วยเมอแคปโทเอทานอล (2-mercaptoethanol) และใช้ยูเรียแยกโปรตีนหน่วยย่อยของไกลิซีนินออกจากกันได้

เบต้า-คอนไกลิซีนินและไกลิซีนินแสดงคุณลักษณะที่แตกต่างกันเป็นอย่างมาก ทั้งทางด้านคุณค่าทางสารอาหารและสมบัติเชิงหน้าที่ โดยที่ไกลิซีนินมีกรดอะมิโนเมทไทโอนีนและซิสเทอีนมากกว่าเบต้า-คอนไกลิซีนินถึง 3-4 เท่า โปรตีนแบบ 11S นั้นมีอุณหภูมิที่ทำให้สูญเสียทางธรรมชาติสูงกว่าโปรตีนแบบ 7S จึงทำให้โปรตีน 11S โกลบูลิน มีความสามารถในการเกิดเจลที่ดีกว่าโปรตีน 7S โกลบูลิน แต่โปรตีน 7S โกลบูลินนั้นมีความสามารถในการเกิดอิมัลชันและความเสถียรของอิมัลชันดีกว่าโปรตีนแบบ 11S (Liu, 1997) โดย García, Torre, Marina และ Laborda (1997) แบ่งประเภทของคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนถั่วเหลือง ดังนี้

1) สมบัติในการอุ้มน้ำ (hydration properties)

1.1) การพองตัว (swelling)

การพองตัวเป็นการวัดการรับน้ำเข้าโครงสร้างของโปรตีน ขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างโปรตีน เมื่อโปรตีนได้รับความร้อนจึงสูญเสียสภาพทางธรรมชาติทำให้ส่วนที่เป็นไฮโดร

โพลี (hydrophobic residues) เปิดตัวออกมา ทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง การพองตัวจึงลดลง โปรตีนจึงไม่ดูดซับน้ำ แต่เกิดเป็นโครงสร้างของเจล (gel matrix) ที่กักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างแทน การพองตัวของโปรตีนจึงขึ้นอยู่กับ คุณภาพของถั่วเหลือง กระบวนการผลิต และสภาวะทางเคมี เป็นต้น

1.2) ความสามารถในการละลาย (solubility)

การที่โปรตีนสูญเสียโครงสร้างดั้งเดิมทางธรรมชาติ อันเนื่องมาจากอุณหภูมิสูง (75 ถึง 94 องศาเซลเซียส) ค่า pH สูง สารเคมีเช่น ยูเรีย เกลือของโลหะหนัก และสารทำลายอินทรีย์ เป็นผลให้โปรตีนเสียกิจกรรมทางชีววิทยา ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางจตุรภูมิ ทำให้ความสามารถในการละลายของโปรตีนลดลง โปรตีนเกาะตัวกันเป็นก้อน และมีความข้นเพิ่มขึ้น

1.3) ความหนืด (viscosity)

ความหนืด เป็นความต้านทานการไหลของของไหล คุณสมบัตินี้เกี่ยวข้องกับความสามารถในการละลาย การพองตัว และเป็นสัดส่วนของการดูดซับน้ำทั้งหมด เมื่อโปรตีนเกิดการพองตัว ขนาดของโปรตีนเพิ่มขึ้นทำให้มีความต้านทานการไหลมากขึ้น ความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความร้อนจนกระทั่งเกิดการสูญเสียสภาพของโปรตีน ซึ่งส่งผลให้ความหนืดลดลงแล้วเกิดเจลที่สามารถเก็บกักน้ำไว้ในโครงสร้างได้ ความเข้มข้นของโปรตีนมากขึ้นส่งผลให้พันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้น จึงทำให้ความหนืดสูงขึ้น

2) คุณสมบัติเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างโปรตีน

2.1) ความสามารถในการเกิดเจล (gel capacity)

เมื่อโปรตีนเกิดการสูญเสียสภาพที่ความเข้มข้นสูง ก่อให้เกิดเจลขึ้นได้ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ ความเข้มข้นของโปรตีน พันธะไดซัลไฟด์ ค่า pH และเกลือในสารละลาย กระบวนการเกิดเจล มี 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนแรกเป็นการเริ่มสูญเสียสภาพที่ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเรียกว่าเป็นการเกิดเจลเบื้องต้น (pregel) ขั้นตอนที่สองเป็นการรวมตัวกันของโมเลกุลโปรตีนที่สูญเสียสภาพเกิดเป็นโครงสร้างของเจล (gel matrix) ที่สามารถเก็บกักน้ำ ไขมัน น้ำตาล กลีโคไลต์ และสารอื่นๆ ไว้ได้ จัดเป็นขั้นตอนที่ไม่ผันกลับซึ่งมีการเชื่อมโยงโครงสร้างของเจลด้วยพันธะไดซัลไฟด์ ไฮโดรเจน และแรงดึงดูดไฮโดรโฟบิกระหว่างโมเลกุลของโปรตีนถั่วเหลือง

3) คุณสมบัติระหว่างผิวน้ำของเฟส (interface properties)

3.1) ความสามารถในการเกิดอิมัลชัน (emulsification)

การที่โมเลกุลโปรตีนมีโครงสร้างทั้งส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic residues) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ จึงทำให้โปรตีนมีสมบัติในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) อิมัลชัน (emulsion) จัดเป็นสารแขวนลอยประเภทหนึ่งที่เป็นระบบของของเหลว 2 เฟส (2-phase liquid system) โดยมีของเหลวชนิดหนึ่งกระจายตัวอยู่ในของเหลวอีกชนิดหนึ่ง สามารถแบ่งระบบอิมัลชันออกเป็น 2 ระบบ ได้แก่ ระบบน้ำในน้ำมัน (water in oil) และระบบน้ำมันในน้ำ (oil in water) กลไกการทำงานของโปรตีนในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์เป็นการหันส่วนที่มีขั้วและมีประจุเข้าหาน้ำ และหันส่วนที่ไม่มีขั้วเข้าหาน้ำมัน การจัดเรียงตัวดังกล่าวทำให้ลดแรงตึงผิวที่รอยต่อระหว่างน้ำและน้ำมันลง จึงทำให้น้ำและน้ำมันเป็นเนื้อเดียวกัน โปรตีนถั่วเหลืองมีความเป็นไฮโดรโฟบิก (hydrophobicity) สูง และสามารถคลายตัวออกเป็นโครงสร้างสายยาวได้ง่าย จึงสามารถแผ่ตัวออกระหว่างรอยต่อและเข้าจับกับส่วนที่เป็นไขมันได้ดี จึงมีความสามารถในการเกิดและลดความตึงผิวของอิมัลชันได้จึงทำให้ไม่เกิดการรวมกลุ่ม (coalescence) ของหยดไขมันขึ้น ความเสถียรของอิมัลชันเพิ่มขึ้นได้เมื่อเพิ่มส่วนของโปรตีน 7S โกลบูลิน คุณสมบัตินี้จึงขึ้นกับความเข้มข้นของโปรตีน ค่า pH การสูญเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีน และสารรีดิวซิ่ง (จิรวัดน์ ยงสวัสดิกุล, 2541)

3.2) ความสามารถในการเกิดโฟม (foam capacity)

โฟมเป็นระบบระหว่างเฟสของก๊าซและของเหลว โดยที่มีของเหลวล้อมรอบฟองอากาศอยู่โดยรอบ โปรตีนถั่วเหลืองมีความสามารถในการเกิดโฟม โดยทำให้ฟองอากาศที่มีฟิล์มของโปรตีนถั่วเหลืองเคลือบผิวหน้าอยู่ซึ่งมีน้ำล้อมรอบอยู่มีความเสถียรได้ กลไกที่เกิดขึ้นเกี่ยวข้องกับกระบวนการไหลออกของน้ำจากบริเวณผิวหน้าแผ่นฟิล์ม (film drainage) ที่เคลือบระหว่างฟองอากาศเอาไว้ โดยฟิล์มที่เกิดขึ้นมีความยืดหยุ่นสามารถป้องกันไม่ให้เกิดการแตกแยกและฉีกขาดออกจากกัน ซึ่งพบว่าโฟมที่เกิดจากโปรตีน 11S โกลบูลิน สามารถชะลอการระบายน้ำออกจากแผ่นฟิล์มได้ดี ทั้งนี้ความสามารถในการเกิดโฟมของโปรตีนถั่วเหลืองขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ค่า pH และปริมาณพันธะไดซัลไฟด์ ของโปรตีน

2.1.2.2 ไขมัน

ถั่วเหลืองจัดเป็นพืชน้ำมันที่มีไขมันสูงถึง 18 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปของไตรกลีเซอไรด์ โดยมีฟอสโฟลิปิด กรดไขมันอิสระ และโลหะอยู่ในปริมาณน้อย กรดไขมันที่พบในถั่วเหลืองมีทั้งกรดไขมันชนิดอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว ที่มีสัดส่วน

คงที่ประมาณ 15 ต่อ 85 และในกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวนี้พบว่ามีการไขมันที่ดีและเป็นกรดไขมันที่จำเป็นต่อร่างกาย ได้แก่ กรดไขมันลิโนเลอิก และลิโนเลนิก อยู่ค่อนข้างสูง ประมาณ 30 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวทั้งหมด เนื่องจากการที่กรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีคาร์บอนจำนวน 18 ตัวอยู่ จึงมีพันธะคู่เป็นจำนวนมาก ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ที่ก่อให้เกิดกลิ่นหืน (rancid) ได้ (ประเสริฐ สายสิทธิ์ และคณะ, 2527)

2.1.2.3 คาร์โบไฮเดรต

ถั่วเหลืองมีคาร์โบไฮเดรต 35 เปอร์เซ็นต์ เป็นองค์ประกอบที่มีมากเป็นอันดับสองรองจากโปรตีน คาร์โบไฮเดรตหรือแซคคาไรด์ (saccharide) ประกอบด้วยน้ำตาลพื้นฐาน ได้แก่ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (monosaccharide) และน้ำตาลโมเลกุลคู่ (disaccharides) โอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharides) และ โพลีแซคคาไรด์ (polysaccharides) สามารถแบ่งคาร์โบไฮเดรตในถั่วเหลืองตามความสามารถในการละลายน้ำออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มคาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำได้และคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ละลายน้ำ โดยเมื่อโมเลกุลของน้ำตาลมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำลดลง (ประเสริฐ สายสิทธิ์ และคณะ, 2527) กลุ่มคาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำ ประกอบด้วย น้ำตาลซูโครส 5.0 เปอร์เซ็นต์ ราฟไฟโนส 1.1 เปอร์เซ็นต์ และสตาซิโอส 3.8 เปอร์เซ็นต์และน้ำตาลชนิดอื่นๆ 5.1 เปอร์เซ็นต์ ส่วนคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ละลายน้ำซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลของน้ำตาลที่ซับซ้อน ประกอบด้วย เซลลูโลส 4.0 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลส 15.0 เปอร์เซ็นต์ และเพคตินที่พบได้ในเปลือกหุ้มเมล็ดถั่วเหลือง รวมทั้งใยอาหารและสตาร์ชในปริมาณที่น้อย (Wijeratne, 1993) คาร์โบไฮเดรตของถั่วเหลืองส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์โดยเฉพาะในสัตว์เคี้ยวเอื้อง ส่วนการแปรรูปเมล็ดถั่วเหลืองมาเป็นอาหารสำหรับการบริโภคของมนุษย์ ทำให้คาร์โบไฮเดรตที่ไม่สามารถละลายได้พบในเปลือกหุ้มเมล็ดถูกแยกออกไป จึงทำให้โอลิโกแซคคาไรด์ของถั่วเหลืองมีบทบาทมากในผลิตภัณฑ์จากแป้งถั่วเหลือง นอกจากนี้คาร์โบไฮเดรตจากถั่วเหลืองยังมีประโยชน์ต่อสุขภาพของผู้บริโภคในด้าน dietary oligosaccharide ซึ่งเกี่ยวข้องกับการบริโภคใยอาหาร (dietary fiber) ที่ทนทานต่อการย่อยในมนุษย์ ช่วยเพิ่มจุลภาวะและลดคอเรสเตอรอลในเลือดของมนุษย์ ช่วยลดความเสี่ยงของมะเร็งลำไส้และโรคอื่นๆ ได้ (Liu, 1997) สมบัติเชิงหน้าที่ของคาร์โบไฮเดรตแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้ (กนกอร อินทราพิเชฐ, 2541; นิธิยา รัตนานนท์, 2543)

1) สมบัติเชิงหน้าที่ของคาร์โบไฮเดรตในอาหารมีดังนี้

1.1) สมบัติในการชอบน้ำและความสามารถในการละลาย (hydrophilicity and solubility)

น้ำตาลมีคุณสมบัติดูดน้ำได้ดีเพราะมีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) มากที่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำด้วยพันธะไฮโดรเจน โดยทำให้เกิดการละลายและสารละลาย ซึ่งมีผลต่อความหนืดของระบบอาหาร การรวมตัวของน้ำกับน้ำตาลช่วยควบคุมวอเตอร์แอกติวิตี (water activity) ในอาหารเป็นสารดูดความชื้น (humectancy) ที่ช่วยป้องกันไม่ให้น้ำเข้าไปในอาหารควบคุมการระเหยหรือการสูญเสียในอาหาร

1.2) ลิแกนด์จับสารกลิ่นรส (binding of flavor ligands)

น้ำตาลมีความสามารถในการรวมตัวและจับกับสารให้กลิ่นรส โดยเปลี่ยนจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลและน้ำ เป็นปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลและสารให้กลิ่นรส สารระเหยพวกสารประกอบคาร์บอนิลและสารประกอบคาร์บอกซิลิกและอนุพันธ์ ถูกตรึงไว้ในอาหารได้ด้วยน้ำตาล และน้ำตาลที่มีขนาดใหญ่มีประสิทธิภาพในการจับกลิ่นรสได้ดี โดยน้ำตาลโมเลกุลคู่จับสารกลิ่นรสได้ดีกว่าน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว

1.3) ความหวาน (sweetness)

คาร์โบไฮเดรตที่มีขนาดโมเลกุลเล็ก มีคุณสมบัติให้ความหวานแตกต่างกันตามชนิดของน้ำตาล สามารถเปรียบเทียบความหวานได้โดยใช้สารละลายซูโครสเป็นมาตรฐาน โดยซูโครสให้ความหวานสัมพัทธ์ (relative sweetness) เท่ากับ 100 และน้ำตาลฟรักโตสมีความหวานสัมพัทธ์เป็น 100-175 เป็นต้น

2) หน้าที่ของโพลีแซคคาไรด์ในอาหาร

2.1) ความสัมพันธ์ของโครงสร้างและสมบัติเชิงหน้าที่ (structure-function relationship)

พฤติกรรมของโพลีแซคคาไรด์ในอาหารขึ้นกับลักษณะโครงสร้างของโมเลกุล ขนาดและแรงระหว่างโมเลกุล คือ พันธะไฮโดรเจน โพลีแซคคาไรด์ที่มีขนาดใหญ่ในอาหารเป็นพวกที่ไม่ละลายน้ำและย่อยไม่ได้ ได้แก่ เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสให้ความกรอบ ความแน่น และความรู้สึกในปาก เส้นใยของโพลีแซคคาไรด์เป็นประโยชน์ต่อทางเดินอาหาร ช่วยในการเคลื่อนที่ของอาหารในลำไส้ และช่วยในการขับถ่าย ส่วนพวกโพลีแซคคาไรด์ที่ละลายน้ำได้ มีสมบัติเชิงหน้าที่ในอาหารในด้านความแข็ง ความกรอบ ความแน่น ความหนืด ความข้นหนืด ความสามารถในการยึดเกาะ และความสามารถในการเกิดเจล เป็นต้น

2.2) การเกิดตะกอนและการเยิ้มน้ำ (retrogradation and syneresis)

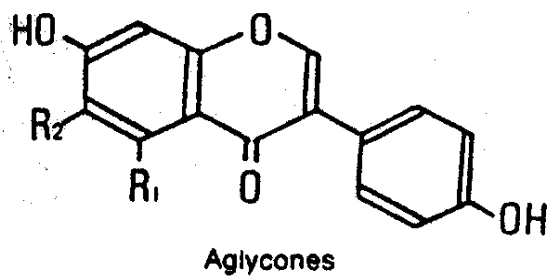
ในสารละลายที่มี pH เป็นกลาง โพลีแซคคาไรด์ที่มีโมเลกุลแบบเส้นตรงสม่ำเสมอสามารถเกิดการรวมตัวกับ โมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงเป็นส่วนที่เป็นผลึก (crystalline region) พร้อมกับการขับน้ำออกจากบริเวณที่เรียงตัวกัน เมื่อมีการรวมตัวกันมากๆ จนเกิดเกาะกันตกเป็นตะกอนด้วยแรงถ่วง เรียกว่า รีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ซึ่งเกิดขึ้นได้โดยการผสมแป้ง (flour) ในน้ำและคนจนทั่ว แล้วเกิดการตกตะกอนและการที่มีน้ำส่วนบนที่ถูกขับออกจากแป้งเป็นขบวนการที่ต่อเนื่องเรียกว่า การเยิ้มน้ำ

2.3) การเกิดเจล (gel formation)

ในสารแขวนลอยที่มีโพลีแซคคาไรด์มารวมตัวกันในบริเวณหนึ่ง (junction zone) มีการรวมตัวกันของโซ่โมเลกุลโพลีแซคคาไรด์ เกิดเป็นโครงร่างแบบ 3 มิติ มีน้ำกระจายตัวตลอด โครงสร้าง เป็นสารละลายที่มีลักษณะเป็นเจล ความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้นได้ตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น และขึ้นกับความแข็งแรงของบริเวณที่รวมตัวกัน ถ้าบริเวณที่รวมตัวกันสั้น โมเลกุลยึดกันไม่แน่น ทำให้โมเลกุลของโพลีแซคคาไรด์แยกตัวออกจากกันได้ง่ายด้วยการให้ความดันและการเพิ่มอุณหภูมิ ส่วนโมเลกุลที่มีกิ่งก้านหรือไม่บริสุทธิ์ไม่สามารถเรียงตัวกันได้เหมาะสม เนื่องจากไม่สามารถทำให้เกิดบริเวณที่รวมตัวกันมีขนาดเพียงพอต่อการเกิดเป็นเจลได้ จึงเกิดเป็นสารละลายที่มีความหนืดเหนียวและเสถียรเท่านั้น

2.1.2.4 ไอโซฟลาโวนส์

ไอโซฟลาโวนส์ (isoflavones) จัดเป็นสารประกอบฟีนอลิก ที่ทำให้เกิดรสขมในถั่วเหลือง โดยอยู่ในรูปสาร 3 ชนิด คือ เจนิสทิน (genistein) เดดะซิน (daidzein) และไกลซีทิน (glycetein) ซึ่งมีโครงสร้างหลักคล้ายคลึงกันแต่มีองค์ประกอบที่แตกต่างกันดังภาพที่ 2.3 จากการศึกษาของนักวิจัยหลายท่านพบว่า ไอโซฟลาโวนส์มีช่วยป้องกันและรักษาโรคมะเร็งเต้านม มดลูก ลำไส้ใหญ่ และต่อมลูกหมาก โรคเกี่ยวกับหลอดเลือดหัวใจ และโรคกระดูกพรุน รวมทั้งลดอาการร้อนวูบวาบในหญิงวัยหมดประจำเดือนได้ (คัคนางค์ ทองสุก, 2542; วัณเพ็ญ มีสมญา, 2543; Liu, 1997; Riaz, 2004) โดยผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองต่างๆ มีปริมาณไอโซฟลาโวน์แตกต่างกันดังตารางที่ 2.1



R ₁	R ₂	Compounds
H	H	daidzein
OH	H	genistein
H	OCH ₃	glycitein

ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของไอโซฟลาโวนส์ทั้งสามชนิด

แหล่งที่มา: Liu (1997)

ตารางที่ 2.1 ปริมาณโปรตีนและไอโซฟลาโวนส์ในผลิตภัณฑ์ถั่วเหลืองต่างๆ

Food	Protein (g/100g)	Isoflavone (mg/g protein)
Mature soybean, uncooked	37.0	5.1
Roasted soybeans	35.2	5.5
Soy flour	37.8	5.5
Textured soy protein, dry	6.0	5.2
Green soybean, uncooked	16.6	3.3
Soymilk	4.4	2.0
Tempeh, uncooked	17.0	3.1
Tofu, uncooked	15.8	2.1
Soy protein isolate, dry	92.0	2.2
Soy concentrate, dry	63.6	0.3

แหล่งที่มา: วัณเพ็ญ มีสมญา (2543)

2.2 กระบวนการเอกซ์ทรูชัน (extrusion process)

เทคโนโลยีเอกซ์ทรูชันหรือการอัดพองมีพื้นฐานมาจากอุตสาหกรรมถลุงแร่ ที่ได้ประดิษฐ์เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (extruder) ชนิดลูกสูบมาใช้ในอุตสาหกรรมการทำท่อตะกั่วแบบไร้รอยตะเข็บขึ้นในปี ค.ศ. 1797 จากนั้นได้รับการพัฒนาเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก (Dziezak, 1989) มีการนำเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์มาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเป็นครั้งแรกในการผลิตไส้กรอก และผลิตภัณฑ์เนื้อแปรรูปอื่น ๆ ในกลางปี ค.ศ. 1930 และได้มีการนำเอาเอกซ์ทรูเดอร์สกรูเดี่ยวมาใช้ในการผลิตพาสตา ต่อมาในปี ค.ศ. 1960 ได้มีการพัฒนาเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ที่สามารถผลิตอาหารเข้าพร้อมบริโภคโดยการทำให้สุกและทำรูปร่างอย่างต่อเนื่องภายในเครื่องเดียวกัน (Harper, 1981) ซึ่งภายหลังได้รับความสนใจในการพัฒนาและปรับปรุงอย่างกว้างขวางจนสามารถนำมาใช้แปรรูปผลิตภัณฑ์อาหารใหม่ๆ ใช้กับวัตถุดิบที่หลากหลายได้ และปลายปีพ.ศ. 2503 ได้มีการประยุกต์นำเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ไปแปรรูปผลิตภัณฑ์โปรตีนที่มีเส้นใยคล้ายเนื้อสัตว์ที่เรียกว่า textured vegetable protein ซึ่งนำเอาโปรตีนจากพืชโดยเฉพาะโปรตีนจากถั่วเหลืองมาเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต ในประเทศไทยคาดว่ามีการนำเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์มาใช้เมื่อปี พ.ศ. 2512 เรียกว่า คอลเลกต์เอกซ์ทรูเดอร์ (collect extruder) จัดเป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ขนาดเล็ก ง่ายต่อการเดินเครื่อง ราคาถูกและประหยัด ใช้ทำอาหารที่สุกพองได้ง่าย เช่น ขนมขบเคี้ยวหรือขนมกรอบที่ใช้ปลายข้าวหรือท่อนข้าว และข้าวโพดหยาบ (corn grit) เป็นวัตถุดิบหลัก ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเบาและกรอบที่มีไขมันสูงและมีโปรตีนต่ำ (ประชา บุญญศิริกุล, 2537)

2.2.1 ประเภทของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์

Rossen และ Miller (1973) ได้จำแนกประเภทของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ตามสมบัติเชิงหน้าที่ ลักษณะทางอุณหพลศาสตร์ และตามจำนวนของสกรู ดังต่อไปนี้

2.2.1.1 การแบ่งประเภทของเอกซ์ทรูเดอร์ตามสมบัติเชิงหน้าที่ในการแปรรูปผลิตภัณฑ์สามารถแบ่งได้เป็น พาสตาเอกซ์ทรูเดอร์ (pasta extruder) ซึ่งเป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์จากแป้งสาลี เช่น มักกะโรนี โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่ถึงกับสุกพอง จำเป็นต้องใช้ขั้นตอนอื่นมาช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์สุกต่อไป เอกซ์ทรูเดอร์ประเภทขึ้นรูปด้วยแรงกดดันสูง (high-pressure forming extruder) เป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่มีความดันสูง เนื่องจากตัวสกรูได้รับการออกแบบให้เป็นชนิดที่ทำให้เกิดแรงอัดสูงมาก อุณหภูมิของโคสูงมากจนทำให้เกิดการสุกพองเกิดขึ้นที่หน้าแปลน เอกซ์ทรูเดอร์ประเภทแรงเฉือนต่ำ (low-shear cooking extruder) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้มีลักษณะเนื้อแน่นมากกว่าการพองตัว เนื่องจากความชื้นหรือไอน้ำที่

มีอยู่ภายในชิ้นอาหารนี้ยังไม่ระเหยกลายเป็นไอน้ำออกไปทันที จึงต้องนำไปอบแห้งและก่อนรับประทานต้องนำไปทอด คั่ว หรือ อบเพื่อทำให้สุกพองเสียก่อน และเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทแรงเฉือนสูง (high-shear cooking extruder) เป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ออกแบบสำหรับทำผลิตภัณฑ์ได้หลายลักษณะ เช่น ประเภทสุกเพียงบางส่วนหรือกึ่งสำเร็จรูป และโปรตีนเกษตรหรือเนื้อเทียม

2.2.1.2 การแบ่งประเภทของเอกซ์ทรูเดอร์ตามหลักการถ่ายเทความร้อน สามารถแบ่งได้ เป็น ออโตจีนัสเอกซ์ทรูเดอร์ (autogenous extruder) ความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้จากการเสียดสี แล้วถูกระบายออกไปจากบารเรล อุณหภูมิภายในเครื่องขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าไปและการจัดรูปแบบของสกรู เช่น คอลเลตเอกซ์ทรูเดอร์ ในขณะที่ไอโซเทอร์มัลเอกซ์ทรูเดอร์ (isothermal extruder) เป็นเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทที่มีระบบการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดความยาวของบารเรล เช่น เอกซ์ทรูเดอร์ประเภทขึ้นรูป และพอลิโทรปิกเอกซ์ทรูเดอร์ (polytropic extruder) ซึ่งโดยทั่วไปเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์เกือบทุกชนิดจัดเป็นประเภทพอลิโทรปิก โดยได้รับความร้อนจากสองทางทั้งจากพลังงานกล และความร้อนที่ได้มาจากแหล่งความร้อนภายนอกที่ส่งผ่านมาทางช่องว่างของบารเรล

2.2.1.3 การแบ่งประเภทของเอกซ์ทรูเดอร์ตามจำนวนสกรู แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

1) เอกซ์ทรูเดอร์สกรูเดี่ยว (single-screw extruder) เป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ที่ประกอบด้วย 1 สกรูขับเคลื่อนภายในบารเรล โดยลักษณะรูปแบบของสกรูมีอิทธิพลต่อการทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ สกรูมีลักษณะเป็นฟันเกลียวหมุนรอบแกนโลหะที่อยู่ภายในบารเรลทรงกระบอก ทำหน้าที่ในการลำเลียงและให้ความร้อนแก่ส่วนผสมของอาหาร และนำส่วนผสมนั้นให้อยู่ในรูปของก้อนวัตถุดิบที่เป็นเนื้อเดียวกันและมีสมบัติด้านความยืดหยุ่น

2) เอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ (twin-screw extruder) เป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ประกอบด้วย 2 สกรูที่มีความยาวเท่ากันอยู่ในบารเรลเดียวกัน เอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ถูกออกแบบให้มีความแตกต่างกันทั้งในการแปรรูป ลักษณะทางกล และกำลังความสามารถของเครื่องจักร ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของเอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ได้ตามตำแหน่งของสกรู คือลักษณะที่เกลียวของสกรูตัวหนึ่งวางหรือซ้อนอยู่ในร่องของสกรูอีกตัวหนึ่ง (intermeshing twin-screw extruder) การทำงานของเครื่องมีลักษณะถูกผลักไปข้างหน้าด้วยการแทนที่ ทำให้มีการผสมอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถทำความสะอาดได้ด้วยตัวเอง ลักษณะที่สกรูสองตัววางอยู่ในตำแหน่งที่ห่างกันไม่ซ้อนพ

ดีกัน (nonintermeshing twin-screw extruder) คล้ายกับมีสกรูเดี่ยวสองตัววางอยู่ข้างๆ กัน เพียงแต่มีช่องว่างเล็กน้อยและมีความสามารถที่สูงกว่า การหมุนของสกรูแต่ละตัวจึงไม่รบกวนซึ่งกันและกัน การทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้ขึ้นอยู่กับแรงเสียดสี (friction) ไม่มีโครงสร้างที่ถูกออกแบบให้ผลักวัตถุดิบไปข้างหน้าจากสกรูตัวหนึ่งไปอีกตัวหนึ่ง ดังนั้นการผสมของวัตถุดิบจึงไม่ดี อีกทั้งยังสามารถแบ่งเอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ได้ตามทิศทางการหมุน คือ ลักษณะที่สกรูสองตัวหมุนไปในทิศทางเดียวกัน (corotating twin-screw extruder) จัดเป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมอาหาร มีความสามารถผลิตอาหารได้หลากหลายชนิด เช่น อาหารสัตว์ ขนมอบเลี้ยง และผลิตภัณฑ์พร้อมรับประทานจากธัญพืช ข้อดีของเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้คือ มีประสิทธิภาพในการขับเคลื่อนอาหารไปข้างหน้า ทำให้เกิดการผสมกันของวัตถุดิบได้ดี สามารถควบคุมระยะเวลาการหุงต้มได้ดี มีระบบการทำความสะอาดด้วยตัวเอง และมีความสม่ำเสมอในกระบวนการแปรรูป และแบบลักษณะที่สกรูสองตัวหมุนในทิศทางตรงกันข้าม (counter-rotating twin-screw extruder) แม้ว่าไม่ได้มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร แต่ก็ถือว่าเป็นเอกซ์ทรูเดอร์ที่มีลักษณะการลำเลียงได้ดีเยี่ยม เหมาะสมในการแปรรูปวัตถุดิบที่ไม่ขึ้นเหนียวโดยใช้ความเร็วรอบต่ำและต้องการเวลาอยู่ในบาเรลนาน ๆ

2.2.2 หลักการทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์

วัตถุดิบถูกเติมลงไปที่ส่วนรับวัตถุดิบ (feed hopper) จากนั้นส่งผ่านไปที่ตัวเอกซ์ทรูเดอร์ วัตถุดิบที่ได้รับการผสม เกิดการหลอมเหลวอยู่ในรูปคล้ายพลาสติก เนื่องจากความดันสูง อุณหภูมิสูง และแรงเฉือน (shear force) ที่เกิดขึ้นในบาเรล จากนั้นวัตถุดิบถูกปรับเปลี่ยนสภาพให้อยู่ในรูปของโดและเกล็ดที่ไปตามทิศทางการหมุนของสกรู ช่วงระยะที่ผ่านตัวเอกซ์ทรูเดอร์นี้ โดถูกทำให้สุกและทำให้เกิดรูปร่างโดยผ่านหน้าแปลน ซึ่งมีรูเปิดหรือช่องอยู่ส่วนปลายของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า เอกซ์ทรูเดต และมีรูปร่างตามรูเปิดที่หัวแปลน (กมลวรรณแจ้งชัด, 2541) ในระหว่างกระบวนการแปรรูปนั้น วัตถุดิบเกิดการเปลี่ยนแปลงหลายรูปแบบทั้งทางด้าน โครงสร้างและด้านเคมี อาทิเช่น การเกิดเจลาติไนซ์ของสตาร์ช (gelatinization) การสูญเสียสภาพทางธรรมชาติของโปรตีน (denaturation) การเกิดสารประกอบของอะมิโลสและไขมัน (amylose-lipid complexes) การเกิดผลิตภัณฑ์ของมิลลาร์ด (Millard products) รวมทั้งการเสียหายของเม็ดสี (pigments) และวิตามิน (vitamins) เป็นต้น (Harper, 1981; Ilo, Liu and Berghofer, 1999)

ในกระบวนการผลิตอาหาร เอกซ์ทรูเดอร์ทำการผสมผสานและปรับเปลี่ยนโครงสร้างของส่วนประกอบที่ไม่น่าดึงดูดใจให้เป็นสารประกอบหรือผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อสัมผัสและรูปร่างที่ดีและมีการยอมรับมากขึ้น การให้ความร้อนทำให้ส่วนประกอบของวัตถุดิบที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์

ร้อนขึ้น หรือสุกมากเพียงพอที่ทำให้แป้งย่อยสลายได้ดีขึ้น ทำลายหรือยับยั้งสารที่เป็นพิษต่อร่างกาย ซึ่งอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชันค่อนข้างสูง (200 องศาเซลเซียส) โดยใช้เวลาสั้นมาก (5-10 วินาที) ในระหว่างการเอกซ์ทรูชันนั้น โครงสร้างดั้งเดิมของโปรตีนถูกเปลี่ยนแปลง เนื่องจากได้รับความร้อนและแรงเฉือนสูง พันธะที่เสถียรโครงสร้างของโปรตีน ได้แก่ แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต พันธะไดซัลไฟด์ พันธะไฮโดรเจน และแรงดึงดูดไฮโดรโฟบิกถูกทำลายเป็นเหตุให้โปรตีนเปิดตัวออก ในสภาวะที่เหมาะสมโปรตีนเหล่านี้สามารถจัดเรียงตัวใหม่ และเกิดลักษณะเนื้อสัมผัสที่แตกต่างไปจากเดิม โดยเฉพาะโปรตีนจากพืช เช่น โปรตีนจากถั่วเหลืองหรือธัญพืชอื่นๆ การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของโปรตีนถั่วเหลืองโดยแรงเฉือนสูงเป็นหลักการในการผลิตเนื้อเทียม (จิรวัดน์ ยงสวัสดิกุล, 2541) จากการศึกษาของ Rebello และ Schaich (1998) พบว่ากระบวนการเอกซ์ทรูชันส่งผลให้ปริมาณโปรตีนทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ลดลงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับวัตถุดิบ อาจเป็นผลมาจากการเกิดเชื่อมโยงหรือการเกาะตัวของสายโมเลกุลของโปรตีน ทั้งอาจเกิดจากการที่กรดอะมิโนสูญเสียโครงสร้างไปมากกว่าที่เกิดการสูญหายของโมเลกุลโปรตีน Dayton และ Allen (1984) มีสมมติฐานว่าโปรตีนจากถั่วเหลืองที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีปริมาณโปรตีน 11S โกลบูลิน เหลืออยู่มากกว่าโปรตีน 7S โกลบูลิน ทั้งยังมีบทบาทต่อคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีน เนื่องจากโปรตีนถั่วเหลืองมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างโมเลกุลเปลี่ยนแปลงไปเป็นแบบเปิดคลายตัวออก ให้ส่วนที่มีความเป็นไฮโดรโฟบิกออกมาจากโครงสร้างภายในเพิ่มขึ้น (Hermansson, 1978)

2.2.3 ประโยชน์ของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, 2541)

2.2.3.1 ทำผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายโดยใช้อุปกรณ์การทำงานชุดเดียวกัน ด้วยการเลือกใช้วัตถุดิบ ส่วนผสม และสภาวะในการแปรรูปต่าง ๆ กัน

2.2.3.2 อัตราการผลิตสูงเนื่องจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์เป็นเครื่องจักรที่มีระบบการผลิตที่ต่อเนื่องและให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความสม่ำเสมอ

2.2.3.3 ต้นทุนในการทำงานต่ำเพราะใช้แรงงานและพื้นที่ในการผลิตน้อย

2.2.3.4 ผลิตรูปแบบของผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย

2.2.3.5 ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพสูง เนื่องจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันเป็นแบบใช้อุณหภูมิสูง และระยะเวลาสั้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว โดยแบคทีเรียที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ เช่น เชื้อซาลโมเนลลา (Salmonella) สามารถถูกทำลายในระหว่างกระบวนการผลิต

2.2.3.6 ใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องเป็นการแปรรูปที่มีความชื้นต่ำทำให้การใช้ความร้อนเพื่อทำให้สุกและแห้งน้อยลง

2.2.3.7 ผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ จากโปรตีนพืช แป้ง โดยการเปลี่ยนแปลงส่วนผสม

2.2.3.8 มีชื่อเสียงจากกระบวนการผลิตน้อย

2.3 การใช้ประโยชน์จากถั่วเหลือง

ถั่วเหลืองสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมน้ำมันพืช อุตสาหกรรมอาหารของทั้งคนและสัตว์ รวมทั้งอุตสาหกรรมทางเคมีต่างๆ อีกมากมาย เนื่องจากถั่วเหลืองเป็นพืชที่มีโปรตีนสูงและมีคุณค่าทางสารอาหารต่อร่างกายใกล้เคียงเนื้อสัตว์ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ทั้งร่างกายยังสามารถดูดซึม โปรตีนจากถั่วเหลือง ไปใช้ได้ดีกว่าเนื้อสัตว์ (คัลนางค์ ทองสุก, 2542)

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองและผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ (น้ำหนักแห้ง)

อาหาร	โปรตีน	ไขมัน	เถ้า	ความชื้น
ผลิตภัณฑ์จากปลา	67.64	9.45	15.14	8.16
ผลิตภัณฑ์จากเนื้อ	79.65	11.82	4.38	4.30
ผลิตภัณฑ์จากข้าวโพด	63.95	3.17	1.54	10.62
ถั่วเหลืองทั้งเมล็ด	43.70	21.80	5.30	-
ผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลือง	47.46	1.97	5.59	12.13
โปรตีนถั่วเหลืองแบบสกัด	86-87	0.5-1.0	3.8-4.8	4-6
โปรตีนถั่วเหลืองแบบเข้มข้น	62-69	0.5-1.0	3.8-6.2	4-6
ผลิตภัณฑ์อาหารจากถั่วเหลือง				
แป้งถั่วเหลืองแบบไขมันเต็ม	42.0	21.0	4.7	<10
แป้งถั่วเหลืองแบบพร่องไขมัน	42-45	0.5-1.0	5-6	6-8
นมถั่วเหลืองแบบไขมันเต็ม	38.0	18.0	<7	<10
นมถั่วเหลืองแบบไขมันต่ำ	48.0	9.0	<5	<5

แหล่งที่มา : García et al. (1997)

ผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการหมัก อาทิเช่น ซอสปรุงรส ซีอิ๊ว เต้าเจี้ยว และเต้าหู้ยี้ เป็นต้น และผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านกระบวนการหมัก อาทิเช่น

น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันถั่วเหลือง เต้าหู้ และแป้งถั่วเหลือง เป็นต้น (ประเสริฐ สายสิทธิ์ และคณะ, 2527; คัคนางค์ ทองสุข, 2542) แป้งถั่วเหลืองที่นำไปใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์อาหารได้แก่ แป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม (full fat soy flour: FSF) ที่มีไขมัน 18-20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก แป้งถั่วเหลืองพร่องไขมันที่มีไขมันต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ แป้งถั่วเหลืองไขมันต่ำ (low fat soy flour: LSF) ที่มีไขมัน 4.5-6 เปอร์เซ็นต์ โปรตีนถั่วเหลืองเข้มข้น (soy protein concentrate: SPC) ที่มีโปรตีน 60-70 เปอร์เซ็นต์ และ โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (soy protein isolate: SPI) ที่มีปริมาณโปรตีนสูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ (Wolf, 1970; Salunkhe and Kadam, 1998) โดยแป้งถั่วเหลืองเหล่านี้สามารถนำไปเป็นส่วนประกอบของอาหารหลากหลายชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติเชิงหน้าที่ของผลิตภัณฑ์โปรตีนถั่วเหลืองในอาหาร

Functional property	Mode of action	Food system used	Product
Solubility	protein solution, pH dependent	beverages	F,C,I ^a
Water absorption and binding	hydrogen-bonding of water, entrapment water	meat, sausages, breads, cakes	F,C
Viscosity	thickening, water binding	soups, gravies	F,C,I
Gelation	protein matrix formation and setting	meats, curds, cheeses	C,I
Cohesion-adhesion	protein acts as an adhesive	meats, sausages, baked goods	F,C,I
Elasticity	disulfide links in deformation gels	pasta product meats, bakery items	I
Emulsification	formation and stabilization of fat emulsion	sausages, bologna soups, cakes	F,C,I
Fat absorption	binding of free fat	meats, sausages, doughnuts	F,C,I
Flavor-binding	adsorption, entrapment	simulated meats, bakery items	C,I
Foaming	foams film to entrap gas	whipped toppings chiffon, desserts, angel cakes	I
Color control	bleaching	bread	F

^a Abbreviations : F,C, and I denote soy flour, concentrate and isolate, respectively
แหล่งที่มา: Endres (2001)

2.4 เนื้อเทียม

เนื้อเทียม (textured vegetable protein) เป็นผลิตภัณฑ์โปรตีนจากพืชที่มีเนื้อสัมผัสและลักษณะปรากฏเลียนแบบเนื้อสัตว์ (meat-like texture product) ส่วนใหญ่ใช้โปรตีนถั่วเหลืองเป็นวัตถุดิบหลักในการแปรรูป จัดเป็นอาหารเพื่อสุขภาพที่เป็นแหล่งของโปรตีนและใยอาหาร (Mahungu, et al. 1999) กระบวนการผลิตเนื้อเทียมมีหลายวิธีการด้วยกัน อาทิเช่น การสร้างเส้นใยในสารละลายที่มีความเป็นกรดและค่าสูง (fiber spinning) กระบวนการอัดพอง (extrusion) การสร้างเนื้อสัมผัสด้วยไอน้ำ (steam texturization) และการสร้างเนื้อสัมผัสด้วยการกดอัด (press texturization) เป็นต้น (Harper, 1981) โดยกระบวนการอัดพองหรือเอกซ์ทรูชันนั้นได้รับความนิยมนำมาใช้ในการผลิตเนื้อเทียมมากที่สุด เพราะนอกจากผลิตภัณฑ์ที่ได้มีเนื้อสัมผัสคล้ายเนื้อสัตว์แล้ว ยังมีต้นทุนในการผลิตต่ำ สามารถผลิตเนื้อเทียมได้อย่างต่อเนื่องในกระบวนการเดียว และสามารถแก้ไขปัญหาด้านสารต่อต้านโภชนาการในถั่วเหลืองได้ (Bjorck and Asp, 1984) แม้ว่ากระบวนการหุงต้มแบบเอกซ์ทรูชัน (extrusion cooking) นำมาใช้ในการผลิตพาสตา และผลิตภัณฑ์อาหารสำเร็จรูปจากรัฐพีชมามากกว่า 60 ปีแล้ว (Ledward and Tester, 1994) แต่เพิ่งเริ่มนำมาใช้ในการผลิตเนื้อเทียมเมื่อเร็วๆ นี้ ในปี ค.ศ. 1970 ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่มีเนื้อสัมผัสคล้ายเนื้อสัตว์จากโปรตีนถั่วเหลืองได้รับการพัฒนาในอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก ประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ ของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมทั้งหมดทำจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์และกระจายไปทั่วภูมิภาคของโลกในรูปของแท่ง (ประชา บุญญศิริกุล, 2539; Harper, 1981)

2.4.1 ประเภทของเนื้อเทียม

2.4.1.1 เนื้อเทียมที่ใช้เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์อาหาร (meat extender) ในปี ค.ศ. 1983 Boison, Toranto และ Cheryan ได้ผลิตเนื้อเทียมชนิดที่นำไปทดแทนเนื้อสัตว์ได้บางส่วน โดยผสม DSF กับสารไฮโดรคอลลอยด์ คือ โซเดียมอัลจิเนต ส่งผลให้เนื้อเทียมมีความแข็งแรงมากขึ้น มีความคงทนต่อการเคี้ยว ความสามารถในการดูดซับน้ำ และความหนาแน่นจำเพาะของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น Payne และ Egbert (1997) ได้ผลิตเนื้อเทียมชนิดที่นำไปทดแทนเนื้อสัตว์ได้บางส่วน จากการแช่ SPI ในน้ำ แล้วสับผสมกับโปรตีนจากพืชหรือคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนอื่นๆ จากนั้นนำไปแช่เย็น แล้วจึงบดให้เป็นชิ้นเล็กๆ ซึ่งสามารถนำไปเป็นส่วนประกอบของซอสเนื้อ สตรูเบอร์จุกกระป๋อง เนื้อบนส่วนหน้าของพิซซ่า และเนื้อของแฮมเบอร์เกอร์ เป็นต้น (Harper, 1981; Lusas, 2004)

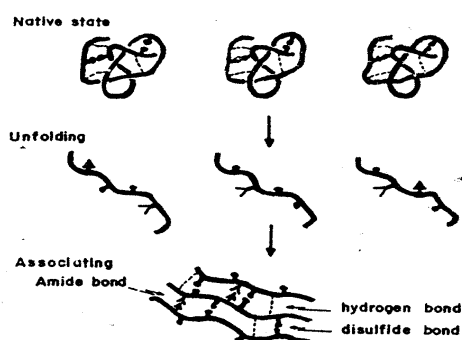
2.4.1.2 เนื้อเทียมที่ใช้แทนเนื้อสัตว์ (meat analog) สามารถนำไปปรุงอาหารได้ทันทีจึงจำเป็นต้องมีลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส รวมทั้งความรู้สึกในปากคล้ายเนื้อสัตว์มากที่สุด

(Harper, 1981; Salunkhe and Kadam, 1989; Endres, 2001) โดย Lin, Huff และ Hsieh (2000, 2002) ได้ทดลองแปรรูปเนื้อเทียมที่มีความชื้นสูง 60 เปอร์เซ็นต์ ด้วย SPI และสตาร์ชชาติได้เนื้อเทียมที่มีเนื้อแน่น ไม่พองตัวและมีลักษณะโครงสร้างแบบเส้นใยคล้ายเนื้อสัตว์มาก นอกจากนี้สามารถแบ่งเนื้อเทียมออกตามปริมาณน้ำในกระบวนการผลิต ได้แก่ ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่ผลิตที่ความชื้นต่ำที่มีความชื้นไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์ ผลิตภัณฑ์มีลักษณะของเส้นใยมีการพองตัวมากและมีรูพรุนมาก ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่มีความชื้นปานกลางต่ำกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ผลิตภัณฑ์พองตัวน้อยและมีโครงสร้างแบบเส้นใย ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่มีความชื้นสูงมากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีการพองตัวและมีโครงสร้างแบบเส้นใยที่คล้ายเนื้อสัตว์มาก และอาจเรียกกระบวนการแปรรูปนี้ว่า กระบวนการเอกซ์ทรูชันแบบเปียก (wet extrusion) (1999; Noguchi, 1989; Lin et al., 2000, 2002)

2.4.2 หลักการของการขึ้นรูปเนื้อสัมผัสของโปรตีนถั่วเหลือง (texturization of soy protein) ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

2.4.2.1 การสูญเสียสภาพดั้งเดิมของโปรตีน เป็นผลมาจากความร้อนและแรงเฉือนซึ่งก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นลำดับขั้นตอนดังภาพที่ 2.4 เมื่ออุณหภูมิและปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นส่งผลให้โปรตีนเริ่มคลายตัวออกจากโครงสร้างแบบก้อนกลม ทำให้แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต พันธะไฮโดรเจน พันธะไดซัลไฟด์ และแรงดึงดูดไฮโดรโฟบิก ที่เชื่อมโยงโครงสร้างของระบบอยู่เกิดการแตกแยกออก หลังจากนั้นโมเลกุลโปรตีนที่เป็นเส้นสายมาเรียงตัวและรวมตัวกันในรูปแบบใหม่ ซึ่งมีผลของสภาวะการเฉือนเข้ามาสนับสนุนด้วย ทำให้ส่วนของโปรตีนบริเวณที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาเข้ามาใกล้กัน จึงเกิดพันธะระหว่างโมเลกุล (intermolecular bonds) ขึ้น แสดงถึงโครงสร้างแบบเส้นใยของโปรตีนที่สูญเสียสภาพมีการสร้างพันธะไฮโดรเจน ไดซัลไฟด์ แรงดึงดูดไฮโดรโฟบิก และพันธะเอไมด์ขึ้นใหม่

2.4.2.2 การเกิดลักษณะโครงสร้างแบบเส้นใย เมื่อโมเลกุลโปรตีน เม็ดแกรนูลของสตาร์ช และอนุภาคต่างๆ ได้รับน้ำ ความร้อนและความดันจากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน เกิดการแตกแยกตัวออกจากโครงสร้าง แล้วจึงมาเรียงตัวในสภาวะของแรงเฉือน ก่อให้เกิดโครงสร้างร่างแหแบบตาข่ายของโปรตีน (protein matrix) ในรูปแบบคล้ายเส้นใย น้ำอิสระในโคโปรตีนที่ร้อนบริเวณหัวแบบมารวมตัวกันเป็นหยดน้ำที่อยู่ในรูปไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่สามารถระเหยและกระจายตัวออกอย่างกะทันหัน เมื่อผลิตภัณฑ์ผ่านรูเปิดของหัวแบบออกสู่ภายนอก ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างแบบเส้นใยที่เชื่อมระหว่างชั้นเนื้อเยื่อของโปรตีน (plexilamella structure) ที่มีรูพรุนปรากฏอยู่ตลอดโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ (Harper, 1981)



ภาพที่ 2.4 กลไกของการสูญเสียสภาพดั้งเดิมทางธรรมชาติของโปรตีน
แหล่งที่มา: Harper (1981)

2.4.3 องค์ประกอบของวัตถุดิบที่มีบทบาทต่อคุณภาพของเนื้อเทียม

2.4.3.1 โปรตีน

องค์ประกอบ ปริมาณ และคุณภาพของโปรตีนถั่วเหลือง มีผลต่อลักษณะทางกายภาพ พันธะเคมี และสมบัติเชิงหน้าที่ของเนื้อเทียม โครงสร้างหลักที่เป็นเส้นใยแบบไฟเบอร์ (fiber) และเลเยอร์ (layer) ของเนื้อเทียมที่ให้ลักษณะคล้ายเนื้อสัตว์ เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนกับโปรตีนและระหว่างโปรตีนกับองค์ประกอบอื่นๆ ปริมาณโปรตีนในวัตถุดิบมีอิทธิพลต่อโครงสร้าง และเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ ซึ่งก่อให้เกิดโครงสร้างหลักที่เป็นเส้นใยคล้ายเนื้อสัตว์ (fibrous meat-like texture) ขึ้น (Stanley, 1989) Maurice และ Stanley (1978) และ Kazemzadeh, Diehl, Rhee และ Dahm (1986) รายงานว่าเมื่อปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นทำให้เอกซ์ทรูเดตมีเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น และมีค่าของแรงเฉือนมากขึ้น โดย Nelson และ Leigh (1983) และ Kearns, Rokey และ Huber (1989) มีความเห็นที่สอดคล้องกันว่าในการทำเนื้อเทียมจากเครื่องเอกซ์ทรูเดตนั้นควรมีปริมาณโปรตีนอย่างน้อย 50 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป คุณภาพของโปรตีนมีความสำคัญต่อสมบัติเชิงหน้าที่ของเอกซ์ทรูเดตจากโปรตีนถั่วเหลือง โดยใช้ความสามารถในการละลายของโปรตีนมาเป็นดัชนี คือ nitrogen solubility index (NSI) Frazier และ Crawshaw (1984) รายงานการเอกซ์ทรูชันแป้งถั่วเหลืองฝงที่มีอนุภาคหยาบ (soya grits) สองชนิดที่มี NSI ต่างกัน พบว่าเนื้อเทียมจากแป้งถั่วเหลืองที่มี NSI สูง มีโครงสร้างร่างแหของโปรตีนที่สม่ำเสมอ มีการกระจายตัวของคาร์โบไฮเดรตตลอดโครงสร้าง ทำให้มีเนื้อสัมผัสที่แข็งแรงกว่าเนื้อเทียมที่ผลิตจากแป้งถั่วเหลืองที่มี NSI ต่ำ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากโปรตีนที่มีค่า NSI สูงสามารถหลอมละลายได้ดี ทำให้เกิดพลาสติกไซเซชัน (plasticization) ได้อย่างสมบูรณ์กว่าโปรตีนที่มีค่า NSI ต่ำ

และอาจเกิดจากการสูญเสียกรดอะมิโนซิสเตอีนที่เกี่ยวข้องกับการเกิดพันธะไดซัลไฟด์ ที่มีบทบาทต่อการพัฒนาเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ (Prudencio-Ferreira and Areas, 1993) โดย Ha (1992) พบว่าเมื่อนำแป้งถั่วเหลืองที่มีค่า NSI 70 เปอร์เซนต์ มาเป็นส่วนผสมในการเอกซ์ทรูชัน ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติแข็งหนึ่ที่และการไหลที่ดี ทำให้ผลิตภัณฑ์มีอัตราการดูดซับน้ำ (water absorption ratio) และอัตราการคืนน้ำกลับคืน (rehydration ratio) ที่ดี

2.4.3.2 คาร์โบไฮเดรต

ความสามารถในการดูดซับน้ำของคาร์โบไฮเดรต มีอิทธิพลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ Rhee, Kuo และ Lusas (1981) รายงานว่าคาร์โบไฮเดรตที่มีความสามารถละลายได้ (soluble carbohydrate) ไม่มีบทบาทสำคัญต่อโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ แต่อาจเกี่ยวข้องกับการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เข้าร่วมในปฏิกิริยา (non-enzymatic reaction) ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์ (Phillips and Finley, 1989) ส่วนคาร์โบไฮเดรตที่ไม่สามารถละลายได้ (insoluble carbohydrate) อาทิเช่น ใยอาหาร (dietary fiber) มีอิทธิพลต่อโครงสร้างภายในแบบโพรงอากาศ (air cell) ของผลิตภัณฑ์ โดย Lue, Hsieh และ Huff (1991) เสนอว่าการเพิ่มปริมาณใยอาหารจากต้นบีททำให้การขยายตัวของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวโพดในแนวรัศมีลดลง แต่มีการขยายตัวทางยาวเพิ่มขึ้น ช่องโพรงอากาศมีขนาดเล็กลงไม่สม่ำเสมอ เมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่เติมใยอาหารจากต้นบีทในปริมาณที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ Smith (1974) รายงานว่าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ก่อให้เกิดการสูญเสียสภาพดั้งเดิมของโปรตีนถั่วเหลือง และทำให้คาร์โบไฮเดรตถั่วเหลืองร้อนอย่างรวดเร็ว เมื่อส่วนผสมของโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตเกิดการพองตัว ทำให้เกิดโครงสร้างเส้นใยจากส่วนของโปรตีน มีส่วนของคาร์โบไฮเดรตไปฝังตรึง (embed) อยู่กับโครงสร้างเส้นใยนั้น จึงเกิดลักษณะของโครงสร้างแบบเส้นใยที่เชื่อมระหว่างชั้นเนื้อเยื่อของโปรตีนขึ้น ซึ่ง Sheard, Ledward และ Mitchell (1984) ได้ยืนยันว่าคาร์โบไฮเดรตที่ฝังตรึงในโครงสร้างเส้นใยนั้น มีส่วนช่วยสนับสนุนโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ให้มีความเสถียรมากขึ้น

2.4.3.3 ไขมัน

ไขมันที่มีอยู่ในส่วนผสมนั้นส่งผลกระทบต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก ในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ไขมันเป็นสารหล่อลื่น (lubricant) ลดแรงเสียดและลดการจับเรียงตัวของอนุภาคลงได้ (Cheftel, Kitagawa, and Queguiner, 1992) ไขมันมีส่วนทำให้ความหนืดของโพลลดลง ทำให้ความดันก่อนถึงหัวแบบไม่เพียงพอต่อการเกิดโครงสร้างแบบเส้นใยของผลิตภัณฑ์ (Ha, 1992) จากงานวิจัยของ Kearns และคณะ (1989) อ้างว่าการผลิตเนื้อ

เทียมจากวัตถุดิบที่มีไขมันอยู่ 0.5-6.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก จำเป็นต้องให้พลังงานในการเลื่อนเพิ่มขึ้นและปรับอุณหภูมิในกระบวนการแปรรูปให้สูงขึ้น รวมทั้งการนำรูปแบบการจัดเรียงสกรูที่ ให้แรงเลื่อนสูงมาใช้ในการผลิตด้วย เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความสมบูรณ์ตามต้องการ จากการ ทำเอกซเรย์ด้วย FSF ของ Gwiazada, Noguchi และ Saio (1987) พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่มี โครงสร้างแบบเส้นใยคล้ายของแข็ง (solid fibrous structure) แต่เมื่อเติม DSF ลงไปในอัตรา ส่วนหนึ่งต่อหนึ่งทำให้เกิดโครงสร้างชนิดนี้ขึ้นได้ Hayakawa (1992) สามารถทำเอกซเรย์-ทรวงู จาก FSF ที่มีไขมันเป็นองค์ประกอบ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องเอกซเรย์แบบสกรู กู ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีโครงสร้างและเนื้อสัมผัสที่ดี แต่มีรูพรุนขนาดใหญ่โดยที่ผนังของรูพรุนมี ไขมันเป็นส่วนประกอบ ทำให้ความแน่น (compactness) ของเนื้อสัมผัสลดลง เป็นไปได้ว่าไขมัน อาจขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนที่ก่อให้เกิดเนื้อสัมผัสของเอกซเรย์-ทรวงู ผลิตภัณฑ์ เนื้อเทียมที่มีไขมันอยู่มากจึงมีลักษณะไม่แน่นเนื้อ มีการพองตัวน้อย และมีความสามารถในการ เก็บกักน้ำต่ำ (Bhattacharya and Hanna, 1988) ส่วน Horvath และ Czukor (1993) ทำเอกซเรย์ ทรวงูวัตถุดิบที่มี FSF อยู่ที่อุณหภูมิและความชื้นสูง พบว่ามีไขมันอิสระแยกตัวออกมาจากแป้งถั่ว เหลืองไขมันเต็มได้ นอกจากนี้ Leigh (1978) ได้นำ FSF ไปแช่ในสารละลายต่างก่อนนำไปเข้า สู่กระบวนการเอกซเรย์-ทรวงู พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีเนื้อสัมผัสหลังคูดน้ำกลับคืนดีขึ้น โครงสร้างไม่ แตกแยกออกจากกันระหว่างการเอกซเรย์-ทรวงู

2.4.3.4 น้ำ

น้ำหรือความชื้นของวัตถุดิบ ทำหน้าที่เป็นตัวถ่ายเทความร้อนและเป็น สารหล่อลื่นของระบบในเครื่องเอกซเรย์-ทรวงู น้ำมีผลต่อการสุกของผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก โดยเฉพาะในระบบที่มีปริมาณน้ำน้อยในกระบวนการเอกซเรย์-ทรวงู จากงานวิจัยของ Tolstogozov (1993) บ่งชี้ว่าน้ำกระทำตัวเป็นพลาสติกไซเซออร์ (plasticization) ของระบบส่งผลให้คุณสมบัติ ทางด้านการไหลของโดเปลี่ยนแปลงไป ทั้งยังมีส่วนทำให้ความหนืดของโดลดลง จนกระทั่งเกิด โครงสร้างเชื่อมโยงที่ไม่สมบูรณ์ตลอดผลิตภัณฑ์ เมื่อเพิ่มความชื้นของวัตถุดิบทำให้อัตราส่วนของ การพองตัวลดลงมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ทำให้ความดันและทอร์ก ภายในเอกซเรย์-ทรวงูลดลง แรงเลื่อนที่กระทำต่อวัตถุดิบลดลง ดังนั้นการผสมและการสร้างเนื้อ สัมผัสจึงเกิดขึ้นน้อย (Maurice and Stanley, 1978) สอดคล้องกับผลการทดลองของ Lin และ คณะ (2000, 2002) พบว่าเมื่อลดความชื้นของวัตถุดิบลงจาก 70 เป็น 60 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เนื้อเทียมมี โครงสร้างภายในที่ชัดเจนขึ้น เนื่องจากแรงเลื่อนและแรงเสียดทานที่บริเวณหัวแบบสูงขึ้น ทำให้ ผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างเส้นใยที่ละเอียดและเป็นไปในทิศทางที่เหมาะสม

2.4.3.5 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

สถานะความเป็นกรดและด่างมีผลต่อรูปแบบการจัดเรียงตัว (conformation) และอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของโปรตีนถั่วเหลือง (Hemmansson, 1979) โดย Dahl และ Villota (1991) ได้เสนอไว้ว่าค่า pH มีอิทธิพลต่อการขยายตัวและการพัฒนาของโครงสร้างแบบเส้นใยที่เชื่อมระหว่างชั้นเนื้อเยื่อของโปรตีนในผลิตภัณฑ์ โดยการเอกซ์ทรูชันโปรตีนถั่วเหลืองที่มีความเป็นกรดให้ผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราการขยายตัวต่ำ มีงานของการเงื่อนไขเพิ่มขึ้นและไม่พบการจัดเรียงตัวแบบเส้นใย เมื่อปรับให้โปรตีนถั่วเหลืองมีความเป็นด่างสูงแล้วนำมาทำเอกซ์ทรูชัน พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะไม่แน่นเนื้อ และโครงสร้างของเอกซ์ทรูแตกแยกตัวออกจากกันหลังแช่น้ำ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Atkinson (1970) ที่พบว่าเมื่อทำการเอกซ์ทรูชันในสถานะที่มีค่า pH 5.5 ทำให้ดำเนินการผลิตได้ยากและผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อนำไปแช่น้ำแล้ว พบว่าเนื้อสัมผัสของเอกซ์ทรูแตกมีลักษณะยืดเหนียว (rubbery) และมีรสเปรี้ยว เมื่อทำการเอกซ์ทรูชันในสถานะที่มีค่า pH มากกว่า 8.5 ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรสฝาด ดังนั้นจึงได้แนะนำว่าควรทำการแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหารโปรตีนที่เลียนแบบเนื้อสัตว์ในช่วง pH 6.5 ถึง 7.5

2.4.4 พันธะเคมีที่มีบทบาทต่อโครงสร้างของเนื้อเทียม

โครงสร้างหลักที่เป็นเส้นใยแบบไฟเบอร์และเลเยอร์ของเนื้อเทียม ที่เกิดขึ้นระหว่างการเอกซ์ทรูชันซึ่งให้ลักษณะคล้ายเนื้อสัตว์นั้น เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนกับโปรตีนและระหว่างโปรตีนกับองค์ประกอบอื่นๆ โดยชนิดพันธะเคมีที่เชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของโปรตีนนั้น ยังเป็นข้อโต้แย้งกันในรายละเอียดหลายประเด็นด้วยกัน นักวิจัยบางท่านได้เสนอว่าพันธะไดซัลไฟด์ พันธะไฮโดรเจน และอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก ที่พบอยู่ในเอกซ์ทรูเดตนั้นมีส่วนสนับสนุนโครงสร้างภายในของเอกซ์ทรูเดตให้มีความเสถียร (Sheard et al., 1984; Hager, 1984) โดย Sheard และคณะ (1984) รายงานว่าพันธะไดซัลไฟด์เป็นพันธะที่มีความสำคัญอย่างมากในการเกิดเนื้อสัมผัสของโปรตีนถั่วเหลือง ส่วนพันธะไฮโดรเจน และอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิกมีความสำคัญต่อโครงสร้างเพียงเล็กน้อย และไม่มีพันธะเคมีชนิดอื่นเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน Hayakawa (1992) ได้ยกประเด็นที่ว่า พันธะไดซัลไฟด์ไม่ได้มีบทบาทสำคัญต่อโครงสร้างของเอกซ์ทรูเดตมากนัก เนื่องจากพันธะไดซัลไฟด์เกิดแตกแยกออกจากกันในระหว่างการแปรรูปซึ่งทำให้โปรตีนมีขนาดเล็กลงและเป็นเส้นตรงมากขึ้น ส่วนงานวิจัยของ Rhee และคณะ (1981) และ Hager (1984) ได้เสนอว่ามีพันธะไดซัลไฟด์เกิดขึ้นใหม่เมื่อผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันและกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างโปรตีนของเอกซ์ทรูเดต นอกจากพันธะเคมีทั้งสามชนิดที่กล่าวมา

แล้ว ยังมีนักวิจัยท่านอื่นๆ (Burgess and Stanley, 1976; Jeunink and Cheftel, 1979; Lin et al., 2000) ที่รายงานถึงพันธะเปปไทด์ที่อาจเกิดขึ้นระหว่างเอ็กซ์ทรูชัน โดย Burgess และ Stanley (1976) อ้างว่าพันธะเปปไทด์ระหว่างโมเลกุล (intermolecular peptide bond) ที่เกิดขึ้นในระหว่างเอ็กซ์ทรูชันมีส่วนช่วยในการเกิดเนื้อสัมผัสของเอ็กซ์ทรูเตตเป็นอย่างมาก และจากผลการทดลองของ Lin และคณะ (2000) พบว่าระหว่างการเอ็กซ์ทรูชันอาจเกิดโพลีเมอร์มวลโมเลกุลสูง หรือพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลอื่นๆ ขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ความสามารถในการละลายของโปรตีนถั่วเหลืองที่ผ่านกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันลดลง

2.4.5 ปัจจัยทางสภาวะเอ็กซ์ทรูชันที่มีผลต่อลักษณะของเนื้อเทียม

2.4.5.1 อุณหภูมิของบารเรล (barrel temperature)

จากงานวิจัยของ Cumming, Stanley และ de Man (1972) พบว่าเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันเพิ่มขึ้น ทำให้แรงเฉือนและงานของแรงเฉือนที่กระทำต่อเอ็กซ์ทรูเตตโปรตีนถั่วเหลืองเพิ่มขึ้น มีผลให้ความหนาแน่นของเอ็กซ์ทรูเตตลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Bhattacharya, Hanna และ Kaufman (1986) พบว่าเมื่อแรงเฉือนเพิ่มขึ้นทำให้เอ็กซ์ทรูเตตมีความหนาแน่นลดลง อัตราส่วนการพองตัวและความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นด้วย จากงานวิจัยของ Lin และคณะ (2000, 2002) พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการหุงต้มระหว่าง 138 ถึง 160 องศาเซลเซียส ไม่ทำให้โครงสร้างภายในของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่มีลักษณะแบบเส้นใยเกิดการเปลี่ยนแปลง จึงไม่ส่งผลกระทบต่อลักษณะทางประสาทสัมผัสของเนื้อเทียมด้วยเช่นกัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นมีผลให้ผลิตภัณฑ์มีความสามารถในการดูดซับน้ำกลับคืนสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงทำให้ตัวอย่างมีการพองตัวเกิดช่องว่างในโครงสร้างมากขึ้นจึงกักเก็บน้ำได้มากกว่า แต่อาจทำให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์อ่อนตัวไม่แข็งแรง เนื่องจากการที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้โครงสร้างของโปรตีนถั่วเหลืองที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่เกิดการแยกตัวออกจากกัน กลายเป็นโปรตีนหน่วยย่อยที่มีขนาดเล็ก จึงพบว่าเอ็กซ์ทรูเตตเกิดการแตกหักอย่างชัดเจน (Cumming et al., 1972)

2.4.5.2 ความเร็วรอบสกรู (screw speed)

ระดับความเร็วรอบสกรูเป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณลักษณะต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ Garber, Hsieh และ Huff (1997) พบว่าเมื่อความเร็วรอบสกรูเพิ่มขึ้นทำให้แรงทอร์คและความดันที่หัวแบบลดลง โดย Chinnaswamy และ Hanna (1988) พบว่าการเพิ่มความเร็วรอบจาก 80 เป็น 150 รอบต่อนาที ส่งผลให้เอ็กซ์ทรูเตตมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเร็ว

รอบขึ้นไปอีกทำให้อัตราการขยายตัวลดลง เนื่องจากที่ความเร็วรอบสูงๆ ทำให้โคมีเวลาอยู่ในบารเรลสั้นลงส่งผลให้อัตราการป้อนวัสดุได้รับความร้อนไม่เพียงพอ จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไม่สมบูรณ์เพียงพอ ส่วน Pili และคณะ (2004) พบว่าการเพิ่มความเร็วรอบสูงๆ ทำให้คุณภาพของเอกซ์ทรูเดตที่มีส่วนผสมของไขมันดีขึ้น และการสูญเสียไขมันระหว่างการเอกซ์ทรูชันลดลง

2.4.5.3 อัตราการป้อนวัตถุดิบ (feed rate)

อัตราการป้อนวัตถุดิบ เป็นปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดต การเพิ่มอัตราการป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เครื่องส่งผลให้อัตราการเติมเต็มของวัตถุดิบภายในบารเรลมากขึ้น ทำให้แรงทอร์คเพิ่มขึ้นและทำให้ความดันที่ทางออกของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น และมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาที่วัตถุดิบอยู่ในเครื่อง (residence time) ซึ่งมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ อาทิเช่น อัตราการขยายตัว และความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์ (Kirby, Ollett, Parker, and Smith, 1988; Pan, Kong, and Chen, 1991)

2.4.5.4 รูปแบบการจัดเรียงสกรู (screw configuration)

ชิ้นส่วนของสกรูและตำแหน่งของชิ้นส่วนต่างๆของสกรู โดยเฉพาะกับเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ มีผลต่อการผสม การขนส่งวัตถุดิบไปยังรูเปิด การถ่ายเทพลังงาน เวลาของวัตถุดิบที่อยู่ภายในเครื่องและแรงเฉือนที่กระทำต่อวัตถุดิบ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง การสร้างรูปร่างของผลิตภัณฑ์ และอุณหภูมิของโค (กมลวรรณ แจ่มชัด, 2541) Kearns และคณะ (1989) พบว่าการผลิตเนื้อเทียมจากวัตถุดิบที่มีไขมันอยู่ 0.5-6.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก จำเป็นต้องให้พลังงานในการเลื่อนเพิ่มขึ้น โดยการนำรูปแบบการจัดเรียงสกรูที่ให้แรงเฉือนสูงมาใช้ในการผลิต เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่มีคุณภาพที่ดี

2.4.6 สมบัติเชิงหน้าที่ของเนื้อเทียมและการตรวจสอบ

2.4.6.1 เนื้อสัมผัส (textural property)

เนื้อสัมผัสเป็นคุณลักษณะที่มีความสำคัญต่อคุณภาพของเนื้อเทียม สามารถนำมาใช้ควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ เนื่องจากเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามสภาวะการแปรรูปและส่วนผสมของวัตถุดิบ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์เนื้อสัมผัสและการทดสอบทางประสาทสัมผัส การตรวจวัดเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสที่นำมาใช้ได้แก่ Kramer Shear Press® ที่ประกอบด้วย CS-1 shear cell ได้ค่าแรงเฉือน (shear force) และงานของการเฉือน (work of shearing) และ

Texture Analyzer ที่ประกอบด้วยหัววัดแบบ Warner-Bratzler shear cell ซึ่งใช้ตรวจสอบความแข็งแรงและความนุ่มเหนียวของเนื้อเทียมได้ (Harper, 1981) ส่วนการทดสอบทางประสาทสัมผัสของเนื้อเทียมสามารถตรวจสอบในด้านความแข็งแรง (hardness) ความคงทนต่อการเคี้ยว (chewiness) ความยืดหยุ่น (springiness) และความเป็นเส้นใย (fibrousness) เป็นต้น

2.4.6.2 อัตราการขยายตัว (expansion ratio)

การขยายตัวของผลิตภัณฑ์อาหารที่แปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน เกิดจากการที่ไอน้ำร้อนในโคระเหยออกจากผลิตภัณฑ์อย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดันและอุณหภูมิเมื่อผลิตภัณฑ์ผ่านหัวแบบออกมาสู่ภายนอกเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ทำให้ส่วนประกอบของโดที่มีความยืดหยุ่นเกิดการขยายตัวและเกิดลักษณะโครงสร้างแบบรูพรุนขึ้น (พอใจ ลิ้มพันธ์อุดม, 2532) อัตราการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดต เป็นสัดส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของผลิตภัณฑ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเปิดที่หัวแบบ โดยอัตราการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ ขึ้นอยู่กับสมบัติด้านความยืดหยุ่นขององค์ประกอบแต่ละชนิดในวัตถุดิบ (Guy and Horne, 1988) Conway และ Anderson (1973) และ Mohamed (1990) มีความเห็นสอดคล้องกันว่าสตาร์ชพองตัวได้มากกว่าโปรตีน ทำให้เอกซ์ทรูเดตสตาร์ชที่เติมโปรตีนถั่วเหลืองและโปรตีนกลูเตนมีการพองตัวลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเอกซ์ทรูเดตสตาร์ชที่ไม่ได้เติมโปรตีน และ de la Gérivière (1976) พบว่าการเติมไขมันถึง 5 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เอกซ์ทรูเดตสตาร์ชมีการพองตัวมากขึ้น แต่เมื่อปริมาณไขมันมากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ทำให้การขยายตัวของเอกซ์ทรูเดตลดลง

2.4.6.3 ความหนาแน่นจำเพาะ (bulk density)

ความหนาแน่นจำเพาะของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน เป็นปัจจัยที่ใช้ในการอธิบายอัตราการพองตัวโดยรวมของผลิตภัณฑ์ได้ดี เมื่อผลิตภัณฑ์มีอัตราการขยายตัวมากขึ้นทำให้ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ลดลง ความหนาแน่นของเอกซ์ทรูเดตเป็นส่วนระหว่างน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ต่อปริมาตรของผลิตภัณฑ์ ซึ่งได้นำวิธีการแทนที่ปริมาตรของผลิตภัณฑ์ตัวอย่างด้วยทรายมาใช้วัดปริมาตรที่แน่นอนของเอกซ์ทรูเดต Hayter และคณะ (1986) พบว่าความเครียดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นจำเพาะ เอกซ์ทรูเดตที่มีความหนาแน่นจำเพาะสูงมีโครงสร้างที่หนาแน่น ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความเครียดสูง Mercier และ Feillet (1975) รายงานว่าการที่วัตถุดิบมีปริมาณอะมิโลสสูงทำให้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์แข็งขึ้นและไม่พองตัว

2.4.6.4 การดูดซับน้ำ (water absorption)

ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับไว้ในผลิตภัณฑ์ มีความสำคัญต่อสมบัติเชิงหน้าที่ โดยเฉพาะลักษณะเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมเมื่อนำมาปรุงอาหาร สามารถตรวจสอบลักษณะการดูดซับน้ำของเนื้อเทียมได้โดยการวัดปริมาณน้ำที่ตัวอย่างดูดซับไว้ต่อมวลของตัวอย่างแห้ง (Harper, 1981) การที่ความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำ แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างที่ชิดแน่น ทำให้ไม่สามารถผ่านเข้าไปในโครงสร้างได้ ดังนั้นเนื้อเทียมที่มีรูพรุนจำนวนมาก จึงมีความสามารถในการดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างได้ดี

2.4.6.5 ดัชนีความสมบูรณ์ของโครงสร้าง (integrity index)

ดัชนีความสมบูรณ์ของเนื้อเทียม เป็นการวัดการความแข็งแรงของโครงสร้างผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม โดยโครงสร้างแบบเส้นใยของเนื้อเทียมที่มีความสมบูรณ์นั้น ทำให้เนื้อเทียมมีความทนทานเมื่อได้รับความร้อนและความชื้น ในสถานะที่คล้ายคลึงกับการหุงต้มอาหาร การทดสอบความสมบูรณ์ของโครงสร้างของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม ทำได้โดยการนำตัวอย่างที่ผ่านการบดแล้วไปแช่น้ำ แล้วนึ่งด้วยไอน้ำร้อน หลังจากนั้นบดตัวอย่างแล้วนำไปร่อน และฉีดล้างด้วยน้ำเปล่าเมื่อซึบน้ำส่วนเกินออก แล้วนำตัวอย่างที่เหลืออยู่ไปชั่งเปรียบเทียบกับน้ำหนักของตัวอย่างหลังคูลน้ำกลับคืน

2.4.7 การปรับปรุงคุณลักษณะของเนื้อเทียม

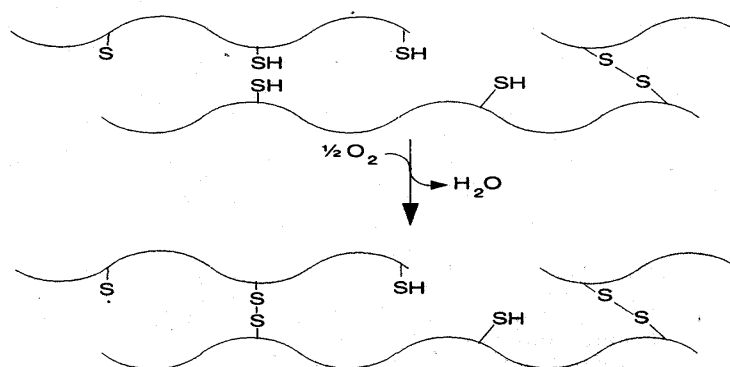
การปรับปรุงคุณภาพของเนื้อเทียมสามารถทำได้หลายวิธีการ ได้แก่ การใส่สารเติมแต่ง โปรตีน และคาร์โบไฮเดรตจากแหล่งอื่นๆ ในวัตถุดิบ การพัฒนาอุปกรณ์ประกอบเครื่องเอกซ์ทราคเตอร์ และการพัฒนากระบวนการแยกชั้นแบบใหม่ โดย Atkinson (1970) ได้ใช้แคลเซียมคลอไรด์เป็นสารที่ช่วยเชื่อมโยงโครงสร้าง (cross-linking agent) มาใช้ปรับปรุงเนื้อสัมผัสของเอกซ์ทราคเตดในสถานะที่ไม่มีไขมันอยู่ด้วย พบว่าการเติมแคลเซียมคลอไรด์ลงไปในส่วนผสมทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างโปรตีนเพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรง ความคงทนต่อการเคี้ยวเพิ่มขึ้น และมีผิวหน้าของผลิตภัณฑ์เรียบขึ้น Kearns และคณะ (1989) แนะนำว่าในการผลิตเนื้อเทียมสามารถใช้แคลเซียมคลอไรด์ 0.5-2.0 เปอร์เซ็นต์ เป็นส่วนผสมได้ การปรับปรุงคุณภาพของเนื้อเทียมด้วยการเติมสารเคมีที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธะเคมี ได้แก่ พันธะไดซัลไฟด์ ซึ่งเป็นพันธะที่มีบทบาทมากในโครงสร้างโปรตีนถั่วเหลือง ทำได้โดยการเติมสารเคมีพวกออกซิไดซิงและรีดิวซิง ที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนหมู่ซัลไฮดริลในโมเลกุลของโปรตีน ดังภาพที่ 2.5 Rhee และคณะ (1981) พบว่าการเติมสารเคมีที่เป็นสารรีดิวซิง เช่น โซเดียมซัลเฟต และซิสเตอีน ทำให้เอกซ์ทราคเตดโปรตีนถั่วเหลืองมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้น และมีผิวหน้าเรียบ ส่วนสารเติมแต่งพวกสารออกซิไดซิง เช่น โพแทสเซียมไอโอเดต ทำให้เอกซ์ทราคเตดจากโปรตีนถั่ว

เหลืองไม่พองตัว มีผิวแตกแยกและขรุขระ ส่วนการเติมอิมัลซิไฟเออร์ (Moore, 1994) และสารไฮโดรคอลลอยด์ อาทิเช่น โซเดียมอัลจิเนต ทำให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อสัมผัสที่ดีเนื้อเทียมมีความแข็งแรงมากขึ้น ความคงทนต่อการเคี้ยว ความสามารถในการดูดซับน้ำ และความหนาแน่นจำเพาะของเอกซ์ทรูเดตเพิ่มขึ้น (Boison et al., 1983) จากงานวิจัยของ วิษฐิตา จันทรพรชัย, เพ็ญขวัญ ชมปริดา และวิชัย หฤทัยธนาสันดี (2537) พบว่าปริมาณของกลูเตนสาลีที่เหมาะสมที่สามารถเติมในแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมันเพื่อผลิตเนื้อเทียมในอัตรา 40 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เนื้อเทียมที่ได้มีความแข็งแรงและมีคุณภาพดีขึ้น Payne และ Egbert (1997) ได้ผลิตเนื้อเทียมชนิดที่นำไปทดแทนเนื้อสัตว์ได้บางส่วน โดยการผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัดกับโปรตีนกลูเตนหรือคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนอื่นๆ เช่น แชนแทน กัม, โลคัสปีน กัม และสตาร์ช ส่วนการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์มีรายงานว่า Sair และ Quass (1976) ได้ปรับปรุงคุณภาพของเนื้อเทียมที่มีไขมันด้วยการใช้ท่อต่อให้ความเย็นที่หัวแบบ (cooling die) และสามารถนำมาใช้กับการแปรรูปของผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูง เพื่อหลีกเลี่ยงการพองตัวของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมได้ (Ha, 1992; Lin et al., 2000, 2002) นอกจากนี้ Wenger, Osterhaus และ Smith (1976) ได้ศึกษาวิธีการแปรรูปเนื้อเทียมด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันแบบสองกระบวนการต่อเนื่องกัน (dual extrusion process) ที่ความชื้น 30 ถึง 45 เปอร์เซ็นต์ ได้ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่เนื้อแน่นและมีเส้นใยจากการเอกซ์ทรูชันครั้งแรก และมีลักษณะเป็นแผ่นเส้นใยคล้ายเนื้อสัตว์ในการเอกซ์ทรูชันครั้งที่สอง ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่ได้มีเนื้อแน่น เกิดโครงสร้างเส้นใยและไม่มีการหดตัวของถั่วหลังแช่น้ำก่อนนำไปปรุงอาหาร ส่วน Feldbrugge, Rankowitz และ Travers (1978) ได้นำเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ไม่ประกอบหัวแบบมาใช้ในการผลิตเนื้อเทียมที่วัตถุดิบมีความชื้นที่ 40 ถึง 55 เปอร์เซ็นต์ พบว่าผลิตภัณฑ์ได้มีเส้นใยที่ดีและเนื้อเทียมมีเนื้อสัมผัสแน่น

2.4.7.1 การนำโพแทสเซียมโบรเมทมาใช้ในการแปรรูปอาหาร

โพแทสเซียมโบรเมท (potassium bromate) เป็นสารออกซิไดซิ่งที่ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพันธะไดซัลไฟด์อย่างช้าๆ ในโครงสร้างโปรตีน ทำให้ผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างคงตัวและความยืดหยุ่นดี จึงนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพของแป้งในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ขนมอบ ซึ่งทำให้มีคุณภาพในด้านการบ่มและการอบดีขึ้น ขนมปังมีปริมาตรและรูปร่างที่ดี (กล้าณรงค์ ศรีรอด และจุนธน วิโรจตบดิษฐ์, 2545) Kohman, Hoffman และ Godfrey (1915) จึงมีการนำโพแทสเซียมโบรเมทมาใช้ปรับปรุงคุณภาพของขนมปัง เนื่องจากโพแทสเซียมโบรเมทเป็นสารออกซิไดซิ่งช่วยให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของหมู่ซัลไฮดริลในโปรตีนกลูเตนทำให้เกิดพันธะไดซัลไฟด์ขึ้นได้ ดังภาพที่ 2.5 มีผลทำให้ปริมาตรของขนมปัง และโครงสร้างของโดแป้ง

สาธิตที่ทำหน้าที่เก็บกักก๊าซดีซัน และพบว่าโพแทสเซียมโบรเมทมีผลต่อการเกิดออกซิเดชันเพนโตแซนและไขมันอิสระในก้อนโด (Patil, Finney, Shogren, and Tsen, 1976; Cunningham and Hlynka, 1958) จากการทดลองของ Panuzzo, Bekes, Wrigley, และ Gupta (1994) รายงานว่าการเติมโพแทสเซียมโบรเมทประมาณ 5-10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของแป้งวัตถุดิบ ทำให้โดมีความทนทานต่อการผสมมากขึ้น โดมีคุณสมบัติในการเก็บรักษาที่ดีขึ้นและก้อนขนมปังมีปริมาณมากที่สุด แต่ถ้าเพิ่มปริมาณโบรเมทมากกว่า 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะทำให้โดเหนียวและแตกแยกออกจากกัน เนื่องจากเกิดสารประกอบระหว่างไขมันกับโปรตีนที่มีโมเลกุลขนาดเล็กด้วยพันธะนอนโควาเลนต์ ทำให้ขนมปังมีคุณภาพในการอบลดลงมาก แต่ทั้งนี้โพแทสเซียมโบรเมทเป็นวัตถุเจือปนในอาหารที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของผู้บริโภค โดย Kurokawa และคณะ (1983) พบว่าการให้เครื่องดื่มที่มีโพแทสเซียมโบรเมทประมาณ 250-500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมกับหนู มีผลต่อการเกิดโรคมะเร็งในไต จึงได้มีข้อกำหนดของปริมาณการเติมโพแทสเซียมโบรเมทในอาหาร โดย FDA กำหนดให้มีโพแทสเซียมโบรเมทในอาหารได้ไม่เกิน 75 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรมของประเทศไทยได้กำหนดปริมาณของโพแทสเซียมโบรเมทในแป้งในปริมาณไม่เกิน 60 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม



ภาพที่ 2.5 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของหมู่ซัลไฟด์ทำให้เกิดพันธะไดซัลไฟด์ในโปรตีน
แหล่งที่มา: Stauffer (1990)

2.4.7.2 การนำแป้งสาลีมาใช้ในการแปรรูปอาหาร

แป้งสาลี (wheat flour) มีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต 60-70 เปอร์เซ็นต์ โปรตีน 12-14 เปอร์เซ็นต์ และไขมัน 1-2 เปอร์เซ็นต์ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2532, 2540; Wrigley and Bietz, 1988) แป้งสาลีมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูง ส่วนใหญ่จะเป็นสตาร์ช (starch) และมีองค์ประกอบอื่นๆ ที่มีปริมาณน้อย ได้แก่ เพนโตแซน

เดกซ์ทริน เซลลูโลส และน้ำตาลอิสระต่างๆ เป็นต้น สตาร์ช (starch) มีลักษณะเป็นแกรนูล (granule) ประกอบด้วยส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน โมเลกุลอะมิโลสเป็นโพลีเมอร์เชิงเส้นสายที่พบอยู่ในส่วนออสัณฐานในเมล็ดแป้ง ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ แอลฟา-หนึ่ง, สี่-ไกลโคซิดิก (α -1,4 glucosidic bond) มีอยู่ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ แป้งที่มีปริมาณ อะมิโลสยาวขึ้น ทำให้มีแนวโน้มการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ลดลง อะมิโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับสารประกอบอินทรีย์ได้ เช่น บิวทานอน กรดไขมัน สารลดแรงตึงผิว ฟีนอล ไฮโดรคาร์บอน และไอโอดีน เกิดเป็นโครงสร้างแบบพืดเป็นเกลียวล้อมรอบสาร ส่วนอะมิโลเพกตินเป็นโพลีเมอร์กิ่งของกลูโคสที่มีส่วนของเส้นตรงเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-หนึ่ง, สี่-ไกลโคซิดิก (α -1,4 glucosidic) ส่วนที่เป็นกิ่งสาขาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ แอลฟา-หนึ่ง, หก-ไกลโคซิดิก (α -1,6 glucosidic) ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2 ล้านหน่วย โครงสร้างของอะมิโลเพกตินมีทั้งส่วนที่เป็นผลึก (crystalline region) และส่วนที่เป็นกิ่งเชื่อมแสดงถึงส่วนอสัณฐาน (amorphous region) แกรนูลสตาร์ชที่สมบูรณ์ไม่ละลายในน้ำเย็น เนื่องจากมีโครงสร้างแบบผลึกที่เกิดจากการเรียงตัวของ อะมิโลสและอะมิโลเพกติน แต่เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงทำให้สตาร์ชละลายน้ำได้และพองตัวได้ เนื่องจากพันธะภายในของแป้งแตกแยกออกจากกันจึงเกิดบริเวณที่มีพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ การซึมผ่านของน้ำเข้าไปในเมล็ดแป้ง ทำให้โซโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินแยกตัวออกจากกันมีส่วนของผลึกลดลง ส่วนของโพลีแซคคาไรด์ที่ละลายน้ำได้ รวมทั้ง อะมิโลสสามารถแยกตัวและไหลออกจากแกรนูล จึงสามารถให้ความหนืดแก่สารละลายแป้ง

โปรตีนของแป้งสาลีจัดเป็นองค์ประกอบที่มีบทบาทต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์อาหารจากแป้งสาลีเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะกลูเตน (gluten) ที่ได้จากการนวดแป้งสาลีให้เข้ากันกับน้ำจนเกิดเป็นโด (dough) ที่มีลักษณะเหนียวและยืดหยุ่นขึ้นเป็นโครงสร้างที่เกิดจากการรวมตัวของโปรตีนไกลอะดลิน (gladins) เป็นโมเลกุลเดี่ยวที่มีขนาดประมาณ 25,000-100,000 และโปรตีนกลูเตนิน (glutenin) เป็นโมเลกุลแบบโพลีเมอร์ที่มีขนาดประมาณ 100,000 (Schofield, 1994; อรอนงค์ นัยวิกุล, 2540) โครงสร้างของกลูเตนที่แข็งแรงและยืดหยุ่นนั้นเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวหลายรูปแบบ ได้แก่ พันธะโควาเลนต์ (covalent bond) ซึ่งประกอบด้วยพันธะเปปไทด์ และพันธะไดซัลไฟด์ และพันธะนอนโควาเลนต์ (non-covalent bonds) ต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยพันธะไฮโดรเจนและแรงดึงดูดไฮโดรโฟบิก กลูเตนถือได้ว่าเป็นโปรตีนบริสุทธิ์ ซึ่งมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบถึง 80 เปอร์เซ็นต์ มีกรดอะมิโนโปรลีนและกลูตามิกในปริมาณมาก แต่มีไลซีน ทรีปโตเฟน และเมทไทโอนีนน้อย เป็นผลให้คุณค่าทางสารอาหารของโปรตีนแป้งสาลีต่ำ เมื่อเทียบกับอาหารพวกเนื้อ นม และไข่ นอกจากนี้แป้งสาลีมีองค์

ประกอบของไขมัน ทั้งอยู่ในรูปอิสระและอยู่แบบเกาะเกี่ยวกับองค์ประกอบอื่นๆ ซึ่งมีทั้งประเภทที่มีประจุ (polar) และไม่มีประจุ (non-polar) โดยพบกรดไขมันไม่อิ่มตัว พวกพอลิติก ลิโนเลอิก และโอเลอิก ในปริมาณสูงกว่ากรดไขมันที่อิ่มตัวชนิดอื่นๆ แม้ว่าแป้งสาลีมีไขมันอยู่น้อย แต่ก็มีความสำคัญต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์โดยเฉพาะขนมปัง (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2532, 2540; Wrigley and Bietz, 1988)

แป้งสาลีเข้ามามีบทบาทในอุตสาหกรรมอาหารที่ใช้กระบวนการเอกซ์ทรูชันในการแปรรูปอาหารหลากหลายชนิด ได้แก่ ผลิตภัณฑ์อาหารเข้าลำไส้รูป อาหารผงสำหรับทารก ขนมขบเคี้ยว เนื้อเทียม ชีสเทียม และสตาร์ชดัดแปลง (modified starch) เป็นต้น (Meuser, Gimmler and van Lengerich, 1992; Cornel and Hoveling, 1998) และมีศึกษาวิจัยผลของสภาวะการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่ใช้แป้งสาลี สตาร์ช และกลูเตนจากแป้งสาลีเป็นวัตถุดิบ ในการแปรรูปผลิตภัณฑ์มาอย่างต่อเนื่อง (Singh and Smith, 1997; Li and Lee, 1997, 1998; Rebello and Schaich, 1999) Redl, Morel, Vergnes และ Guilbert (2000) ได้ศึกษาผลของตัวแปรทางเอกซ์ทรูชันต่อคุณสมบัติทางการไหลของโปรตีนกลูเตน ซึ่งมีผลกระทบต่อลักษณะของเอกซ์ทรูเดต กลูเตนสาลีที่เกิดขึ้น พบว่าสภาวะในการแปรรูปมีผลต่อลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงจากผิวหน้าเรียบของตัวดี จนกระทั่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่แตกแยกไม่เป็นรูปร่าง เมื่อปรับเปลี่ยนความเร็วรอบสกรู อัตราการป้อนวัตถุดิบ และอุณหภูมิของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ส่วน Rebello และ Schaich (1999) ได้ศึกษาผลกระทบของการเอกซ์ทรูชันต่อโปรตีนของแป้งสาลี โดยพบว่าโปรตีนไกลอะดินได้รับผลกระทบมากที่สุด โดยโมเลกุลไกลอะดินเกิดการแตกแยกออกเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง ส่วนโปรตีนกลูเตนที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ได้รับผลกระทบจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันเพียงเล็กน้อย Mohamed (1990) แนะนำการเติมกลูเตน โปรตีนในวัตถุดิบที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก ทำให้อัตราการพองตัวของเอกซ์ทรูเดตสตาร์ชมีค่าลดลง Conway และ Anderson (1973) รายงานว่าการเติมโปรตีนถั่วเหลืองสกัดในแป้งข้าวโพด ทำให้อัตราการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดตลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวโพดที่ไม่ได้เติมโปรตีนถั่วเหลืองสกัด เนื่องมาจากโปรตีนมีการพองตัวต่ำกว่าสตาร์ช ส่วน Lin และคณะ (2000, 2002) ได้แปรรูปเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองสกัดและสตาร์ชของสาลีด้วยเครื่องเอกซ์ทรู-เดอร์แบบสกรูคู่ ที่ความชื้นสูงมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อแน่นไม่พองตัวและมีลักษณะเส้นใยคล้ายเนื้อสัตว์มาก

การแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหารที่มีส่วนผสมของแป้งสาลี และแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมันด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ได้รับความสนใจและนำมาใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารหลาย

ประเภท อาทิเช่น เนื้อเทียม พาสตา อาหารสำเร็จรูป และขนมขบเคี้ยว เป็นต้น เนื่องจากส่วนผสมของแป้งถั่วเหลืองและแป้งสาลีมีส่วนช่วยปรับปรุงลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของผลิตภัณฑ์อาหาร และช่วยเพิ่มคุณค่าทางสารอาหาร โดยเฉพาะโปรตีนที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารมีกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกายครบถ้วน ทั้งยังมีสารที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพช่วยลดอาการของโรคต่างๆ ได้ โดย Murkies และคณะ (1995) รายงานว่าถั่วเหลืองและข้าวสาลีทั้งเมล็ด จะมีสารประกอบทางพฤกษเคมีที่มีโครงสร้างคล้ายกับฮอร์โมนเอสโตรเจนในมนุษย์ โดยถั่วเหลืองมีเดดะซิน (daidzein) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของไอโซฟลาโวนอยด์ (isoflavonoids) และข้าวสาลีมีเอนเทรอลแลคโตน (enterolactone) เป็นสารประกอบเส้นใยที่มีฟีนอลิกเป็นองค์ประกอบ (fiber-associated phenolic compound) จัดอยู่ในกลุ่มลิกแนน (lignan phytoestrogen) ซึ่งมีส่วนช่วยลดการเกิดอาการร้อนวูบวาบ (hot flushes) ซึ่งเป็นอาการป่วยของผู้หญิงในวัยหมดประจำเดือนลงได้

2.5 รายการอ้างอิง

- กนกอร อินทราพิเชฐ. (2541). เอกสารประกอบการสอนวิชา 305 322 เคมีอาหาร. สาขาเทคโนโลยีอาหาร. สำนักเทคโนโลยีการเกษตร. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี: นครราชสีมา.
- กมลวรรณ แจ่มชัด. (2541). การแปรรูปอาหารโดยวิธีเอกซเรย์. อดสาหกรรมเกษตร. 9(2): 4-8 .กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. ศูนย์สารสนเทศการเกษตร.
- (2547). สถิติการค้าสินค้าเกษตรกรรมไทยกับต่างประเทศ ปี พ.ศ. 2546. เอกสารทางสถิติการเกษตรเล่มที่ 404: กรุงเทพมหานคร.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด และจันทน์ วีระเจตบดิษฐ์. (2545). พจนานุกรม Food additive. จารุพาเท็คเซ็นเตอร์: กรุงเทพมหานคร.
- คัคนางค์ ทองสุก. (2542). ถั่วเหลือง อาหารสุขภาพ. อาหาร. 29: 212-213.
- คมสัน หุตะแพทย์ และ วารี ยินดีชาติ. (2542). ถั่วเหลือง พืชมหัศจรรย์สารพันประโยชน์. สยามศิลป์การพิมพ์: กรุงเทพมหานคร.
- จิรวัดน์ ขงสวัสดิกุล. (2541). เอกสารประกอบวิชา 305 321 Food Chemistry. 2nd. สาขาเทคโนโลยีอาหาร. สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี: นครราชสีมา.
- นิธิยา รัตนาปนนท์. (2543). เคมีอาหาร. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. คณะอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่: เชียงใหม่.

- ปิยมาศ มหาบุญญานนท์. (2546). **คุณลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างภายในของพาสตาข้าวเจ้าที่ได้จากการอัดพองโดยใช้ข้าวพันธุ์ต่างๆ**. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอาหาร. สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี: นครราชสีมา.
- ประชา บุญญศิริกุล. (2537). บทบาทของเอกซ์ทรูเดอร์ที่มีต่ออุตสาหกรรมอาหารในประเทศไทย. *อาหาร*. 24(1): 1-12.
- ประชา บุญญศิริกุล. (2539). เทคโนโลยีการอัดพองในกระบวนการผลิตอาหาร. *อาหาร*. 26: 235-248.
- ประเสริฐ สายสิทธิ์ และคณะผู้ช่วยจากสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร. (2527). **ถั่วเหลืองและการใช้ประโยชน์ในประเทศไทย**. สยามออฟเซ็ท: กรุงเทพมหานคร.
- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. (2541). **วิศวกรรมอาหาร: หน่วยปฏิบัติการในอุตสาหกรรม**. ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์. คณะอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพมหานคร.
- วันเพ็ญ มีสมญา. (2543). ถั่วเหลืองในสหัฐวรรษใหม่. *อาหาร*. 30: 52-58.
- วิจิตา จันทรพรชัย, เพ็ญขวัญ ชมปริดา และวิชัย หฤทัยธนาสันดี. (2537). **การพัฒนาผลิตภัณฑ์จากโปรตีนถั่วลิสงแปลงเนื้อสัตว์**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพมหานคร. (การประชุมเชิงวิชาการครั้งที่ 32. 3-5 กุมภาพันธ์ 2537).
- อนันต์ ลีอจกร. (2535). **กล้องจุลทรรศน์และเทคนิคการถ่ายภาพทางชีววิทยา**. โอ เอส พรินติ้ง เฮาส์: กรุงเทพมหานคร.
- อภิพรรณ พุกภักดี. (2546). **ถั่วเหลือง: พืชทองของไทย**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพมหานคร.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2532). **เคมีทางสัตววิทยา**. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. คณะอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพมหานคร.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2540). **ข้าวสาลี: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. พิมพ์ครั้งที่ 2. เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชัน: กรุงเทพมหานคร.
- Aguilera, J.M. and Stanley, D. W. (1999). **Microstructural principles of food processing and engineering**. Aspen Publishers: Maryland, USA.

- Akdogan, H. (1999). High moisture food extrusion. **International J. of Food Sci. and Technol.** 34: 195-207.
- Atkinson, W.T. (1970). **Meat-like protein food product**. U.S. Patent 3,488,770.
- Bhattacharya, M. and Hanna, M.A. (1988). Effect of lipid on the properties of extruded product. **J. Food Sci.** 53: 1230-1231.
- Bhattacharya, M., Hanna, M.A. and Kaufman, R.E. (1986). Textural properties of extruded plant protein blends. **J. Food Sci.** 51: 988-993.
- Bjorck, I. and Asp, N-G. (1984). The effect of extrusion cooking on nutritional value - A literature review. In R. Jowitt (ed.), **Extrusion cooking technology**. Elsevier Applied Science Publishers: New York, USA.
- Boison, G., Taranto, M.V. and Cheryan, M. (1983). Extrusion of defatted soy flour-hydrocolloid mixtures: Effect of operating parameters of selected textural and physical properties. **J. Food Technol.** 18: 719-730.
- Burgess, L.D. and Stanley, D.W. (1976). A Possible mechanism for thermal of soybean protein. **J. Ints. Can. Sci. Technol. Aliment.** 9: 228-229.
- Cheftel, J.C., Kitagawa, M. and Queguiner, C. (1992). New protein texturization process by extrusion cooking at high moisture level. **Food Review International.** 8: 235-242.
- Chinnaswamy, R. and Hanna, M.A. (1988). Optimum extrusion cooking conditions for maximum expansion of corn starch. **J. Food Sci.** 53(3): 834-836, 840.
- Conway, H.F. and Anderson, R.A. (1973). Protein-fortilized extruded food products. **Cereal Sci Today.** 18(4): 94-97.
- Cornel, H.J. and Hoveling, A.W. (1998). **Wheat chemistry and utilization**. Technomic Publishing: Pennsylvania, USA.

- Cumming, D.B., Stanley, D.W. and de Man, J. M. (1972). Texture-structure relationships in texturized soy protein. II Textural properties and ultrastructure of an extruded soybean product. **J. Ints. Can. Sci.Technol. Aliment.** 5: 124-128.
- Cunningham, D.K. and Hlynka, I. (1958). Flour lipid and the bromate reaction. **Cereal Chem.** 55: 401-410.
- Dahl, S.R. and Villota, R. (1991). Effect of thermal denaturation on the texturization of soybean protein via twin-screw extrusion. **Can. Ints. Food Sci.Technol. J.** 24: 1-4.
- de la G rivi re, J.F. (1976). Principles of the extrusion-cooking process. Application to starchy foods. **Bull Anc. El. Ec. Fr. Meun.** 276: 305-314.
- Dziezak, J.D. (1989). Single and twin-screw extruders in processing. **Food Technol.** 43: 164-174.
- Endres, J. G. (2001). **Soy protein products. Characteristics, nutritional aspects and utilization.** AOCS Press: USA.
- Feldbrugge, A., Rankowitz, M.M., and Travers, C.K. (1978). Vegetable protein extrurization by low pressure extrusion. **AIChE Symp. Ser.** 74(172): 148.
- Frazier, P.J. and Crawshaw, A. (1984). Relationship between die-viscosity, ultrastructure and texture of extruded soya protein. In P. Zeuthen, J.C. Cheftel, C. Eriksson, M. Jul, H. Leniger, P. Linko, G. Varela and G. Vos (eds.), **Thermal processing and quality of foods.** pp. 89-95. Elsevier Applied Science Publishers: England.
- Garber, B. W., Hsieh, F. and Huff, H. E. (1997). Influence of particle size on the screw extrusion of corn meal. **Cereal Chem.** 74(5): 656-661.

- Garcia, M.C., Torre, M., Marina, M. L. and Laborda, F. (1997). Composition and characterization of soybean and related products. **Crit. Rev. in Food Sci. and Nutri.** 37(4): 361-391.
- Gwiazada, S., Noguchi, A. and Saio, K. (1987). Microstructure studies of texturized vegetable protein products: Effect of oil addition and transformation of raw materials in various sections of twin screw extruder. **Food Micro.** 6: 57-61.
- Guy, R.C.E. and Horne, A.W. (1988). Extrusion and co-extrusion of cereals. In J. M. V. Blanshard and J. M. Mitchell. (eds.), **Food structure-its creation and evaluation.** pp. 331-349. Butterworths: London, England.
- Ha, T.T. (1995). **Texturization of low-fat extruded/expelled soy flour by twin-screw extruder.** M.A. Thesis. Food Science. University of Illinois at Urbana-Champaign: USA.
- Hager, D.F. (1984). Effects of extrusion upon soy concentrate solubility. **J. of Agric. Food Chem.** 32: 293-296.
- Harper, J.M. (1981). **Extrusion of foods. Vol. II.** CRC Press: Boca Raton, Florida, USA.
- Hayakawa, I. (1992). **Food processing by ultra high pressure twin screw extrusion.** Technomic Publishing: USA.
- Hayter, A. L., Prescott, E. H. A. and Smith, A.C. (1987). Application of the IFR portable pendulum for the assessment of the mechanical properties of solid foams. **Polym. Test.** 7: 27-38.
- Hayter, A. L., Smith, A.C. and Richmond, P. (1986). The physical properties of extruded food foams. **J. Master. Sci.** 21: 3729-3736.

- Hermansson, A.M. (1978). Physico-chemical aspects of soy proteins structure formation. **J. of Texture Studies**. 9: 33-58.
- Hermanson, A.M., Langton, M. and Loren, N. (2000). New approaches to characterizing food microstructures. **MRS Bullentin/Dec.**: 30-36.
- Horvath, E. and Czukor, B. (1993). Effect of extrusion temperature and initial moisture content on protein solubility and distribution in full fat soybean. **Acta Alimentaria**. 22: 151-154.
- Ilo, S., Liu, Y. and Berghofer, E. (1999). Extrusion cooking of rice flour and amaranth blends. **Lebensm. Wiss. U. Technol**. 32: 79-88.
- Jeunink, J. and Cheftel, J.C. (1979). Chemical and physicochemical change in field bean and soybean protein texturized by extrusion. **J. Food Sci**. 44: 1322-1328.
- Kazemzadeh, M., Diehl, K.C. JR., Rhee, K. C. and Dahm, P.F. (1986). Mechanical and structural evaluation of texturized soy proteins of varying protein content. **Cereal Chem**. 63(4): 304-310.
- Keane, M., Bowyer, M., Galvin, K., Biggs, S. and Hosken, R. (n.d.). **Laser scanning confocal microscopy of dairy based emulsion**. (Online). Available URL: [http:// www. Google.com](http://www.Google.com).
- Kearns, J.P., Rokey, G.J. and Huber, G.R. (1989). Extrusion of texturized proteins. In T.H. Applewhite (ed.), **Proceedings of the world congress on vegetable protein utilization in human foods and animal feedstuffs**. American Oil Chemistry Society: Champaign IL, USA.

- Kirby, A.R., Ollett, A.L., Parker, R. and Smith, A.C. (1988). An experimental study of screw configuration effects in the twin-screw extrusion cooking of maize grits. **J. Food Eng.** 8:247-272.
- Kohman, H.A., Hoffman, C. and Godfreg, T.M. (1915). **Manufacture of bread.** U.S. Patent. 1,148,328.
- Kurokawa, Y. Hayashi, Y., Mackawa, A., Takahashi, T., Kokubo, T. and Odashima, S. (1983). Carcinogenicity of potassium bromate administered orally to F344 rats. **J. Nat. Cancer Inst.** 71: 965-970.
- Lamprecht, A., Schafer, U.F. and Lehr, C-M. (2000). Characterization of microcapsules by confocal laser scanning microscopy: Structure, capsule wall composition and encapsulation rate. **European J. of Pharmaceutics and Biopharmaceutics.** 49: 1-9.
- Ledward, D.A. and Tester, R.F. (1994). Molecular transformations of proteinaceous foods during extrusion processing. **Trends in Food Sci. and Technol.** 5: 117-120.
- Leigh, J.S. (1978). **Extrusion texturization of whole soybean for use in meat analogs.** Ph.D.Dissertation. University of Illinois at Urbana- Champaign: USA.
- Li, M. and Lee, T.C. (1997). Relationship of the extrusion temperature and the solubility and disulfide bond distribution of wheat proteins. **J. of Agric. Food Chem.** 45: 2711-2717.
- Li, M. and Lee, T.C. (1998). Effect of cysteine on the molecular weight distribution and disulfide cross-link of wheat flour proteins in extrudates. **J. of Agric. Food Chem.** 46: 846-853.

- Lin, S., Huff, H.E. and Hsieh, F. (2000). Texture and chemical characteristics of soy protein meat analog extruded at high moisture. **J. of Agric. Food Chem.** 65(2): 264-269.
- Lin, S., Huff, H.E. and Hsieh, F. (2002). Extrusion process parameters, sensory characteristics, and structural properties of a high moisture soy protein meat analog. **J. Food Sci.** 67: 1066-1072.
- Liu, K. (1997). **Soybeans: chemistry, technology, and utilization.** Chapman and Hall: New York, USA.
- Lue, S., Hsieh, F. and Huff, H.E.(1991). Extrusion cooking of corn meal and sugar beet fiber content. **Cereal Chem.** 68(3): 227-234.
- Lusas, E. (2004). **Modern texturized soy proteins: Preparation and uses. Food protein research and development center.** Texas A & M University: Texas, USA.
- Mahungu, S.M., Diaz-Mercado, S., Schwenk, L. M., Singletary, K. and Faller, J. (1999). Stability of isoflavones during extrusion processing of corn/soy mixture. **J. of Agric. Food Chem.** 47: 279-284.
- Maurice, T.J., and Stanley, D.W. (1978). Texture-structure relationships in texturized soy protein IV. Influence of process variables on extrusion texturization. **J. Ints. Can. Sci. Technol. Aliment.** 11: 1- 6.
- Mercier, C. and Feillet, P. (1975). Modification of carbohydrate components by extrusion-cooking of cereal products. **Cereal Chem.** 52(3): 283-297.
- Meuser, F., Gimmler, N. and van Lengerich, B. (1992). A system analytical approach to extrusion. In J.L. Kokini, C. Ho and M.V. Karwe (eds.), **Food extrusion science and technology.** pp. 619-630. Marcel Dekker: New York, USA.

- Mohamed, S. (1990). Factor affecting extrusion characteristics of expanded food products. *J. Food Proc. Preserv.* 14: 437-452.
- Moore, G. (1994). Snack food extrusion. In N.D. Frame (ed.), **The technology of extrusion cooking**. pp.111-143. American Association of Cereal Chemists: St. Paul, Minn., USA.
- Murkies, A.L., Lombard, C., Strauss, B. J. G., Wilcok, G., Burger, H.G. and Morton, M.S. (1995). Dietary flour supplementation decrease post-menopausal hot flush: Effect of soy and wheat. *Maturitas*. 21: 189-195.
- Nelson, A.I. and Leigh, J.S. (1983). **Extrusion texturization of full-fat soybean and product thereof**. U.S. Patent. 4,369,195.
- Noguchi, A. (1989). Extrusion cooking of high-moisture protein foods. In C. Mercier, P. Linko, and J.M. Harper (eds.), **Extrusion cooking**. pp. 343-370. American Association of Cereal Chemists: St. Paul, Minn., USA.
- Pan, B.S., Kong, M.S. and Chen, H. H. (1991). Twin screw extrusion for expanded rice product: Processing parameter and formation of extruded properties. In J. L.Kokini, C. T. Ho, and M.V. Karwe (eds.), **Food extrusion science and technology**. pp. 693-709. Marcel Dekker: New York, USA.
- Panuzzo, J.F., O'Brien, L., MacRitchie, F. and Bekes, F. (1990). Baking quality of Australian wheat cultivars varying in their free lipid composition. *J. Cereal Sci.* 11: 51-57.
- Patil, S-K., Finney, K.F., Shogren, M.D. and Tsen, C.E. (1976). Water-soluble pentosans of wheat flour III. Effect of water-soluble pentosans on loaf-volume of reconstituted gluten and starch doughs. *Cereal Chem.* 53: 347-354.

- Payne, T. and Egbert, R. (1997). **Process for making vegetable-based meat extenders**. U.S. Patent . 5,625,899.
- Phillips, R.D. and Finley, J.W. 1989. **Protein quality and the effects of processing**. Marcel Dekker: New York, USA.
- Pilli, T.D., Severini, C., Baiano, A., Derossi, A., Anhalias, A. and Legrand, J. (2004). Effect of operating conditions on oil loss and properties of products obtained by co-rotating twin-screw extrusion of fatty meal: Preliminary study. **J. of Food Eng.** Article in press.
- Prudencio-Ferreira, S.H. and Areas, J.A.G. (1993). Protein–protein interactions in the extrusion of soya at various temperatures and moisture content. **J. of Food Sci.** 58(2): 378-381.
- Raiz, M.N. (2004). **Soybeans as functional foods. Food protein research and development center**. Collage Station: Texas, USA.
- Rebello, C.A. and Schaich, K.M. (1999). Extrusion chemistry of wheat flour proteins: II sulfhydryl-disulfide content and protein structure changes. **Cereal Chem.** 76(5): 756-763.
- Redl, A., Morel, M., Vergnes, B. and Guilbert S. (2000). Rheological and biochemical approaches describing changes in molecular structure of gluten protein during extrusion. In P.R. Shewry and A.S. Tatham (eds.), **Wheat gluten**. pp. 430-440. MPG Books: Cornwall, England.
- Rhee, K.C., Kuo, C.K. and Lusas, E.W. (1981). Texturization. In J.P. Cherry (ed.), **Protein functionality in food**. American Chemistry Society: Washington DC, USA.
- Rossen, J.L. and Miller, R. C. (1973). **Food extrusion. Food Tech.** 27(8):46-53.

- Sair, L. and Quass, D.W. (1976). **Process for producing hydratable, translucent to glassy, proteinaceous products, and their resulting products.** U.S. Patent. 3,698,268.
- Salunkhe, D. K. and Kadam, S.S. (1989). **CRC Handbook of world food legumes: Nutritional chemistry, processing technology and utilization.** Vol. III. CRC Press: Florida, USA.
- Singh, N. and Smith, A.C. (1997). A comparison of wheat starch, whole wheat meal and oat flour in extrusion cooking process. **J. of Food Eng.** 34: 15-32.
- Schofield, J.D. (1994). Wheat proteins: Structure and functionality in milling and breadmaking. In W. Bushuk and V.F. Rasper (eds.), **Wheat production, properties and quality.** pp.73-106. Chapman and Hall: Glasgow, England.
- Sheard, P.R., Ledward, D.A. and Mitchell, J.R. (1984). Role of carbohydrates in soya extrusion. **J. Food Tech.** 19: 475-483.
- Smith, O.B. (1974). Textures by extrusion processing, presented at Am. Chem. Soc.- Div. Agri. **Food Chem.** March. 28.
- Stanley, D.W. (1989). Protein reaction during extrusion cooking. In C. Mercier, P. Linko and J.M. Harper (eds.), **Extrusion cooking.** pp. 321-341. American Association of Cereal Chemists: St. Paul, Minn., USA.
- Stauffer, C. E. (1990). **Functional additives for bakery foods.** An avi Book: New York, USA.
- Tolstoguzov, V. B. (1993). Thermoplastic extrusion-the mechanism of the formation of extrudate structure and properties. **JAOCs.** 70(4): 417-424.
- van Lengerish, B. (1997). Influence of extrusion processing on in-line rheology behavior, structure and function of wheat starch. In H. Faridi and J.M.

Faubion (eds.), **Dough rheology and baked product texture**. pp. 421-471.

Asia Printograph: New Delhi, India.

Wenger, L. V. G., Osterhaus, E. J. and Smith, O. B. (1976). **Method of preparing dense, uniformly layered protein meat analogue**. U. S. Patent 3,970,761.

Wijeratne, W.B. (1993). Composition of soybean. In K. Tanteeratarn. (ed.), Soybean processing and its uses. pp. 9-17. **International soybean program**. Collage of Agriculture. University of Illinois at Urbana-Champaign: Illinois, USA.

Wrigley, C.W. and Bietz, J.A. (1988). Protein and amino acids. In Y. Pomeranz (ed.), **Wheat: Chemistry and technology**. Vol. I. 3rd. pp. 159-275.

American Association of Cereal Chemists: Minnesota, USA.

Wolf, W.J. (1970). Soybean proteins: Their functional, chemical and physical properties. **J. of Agric. Food Chem.** 18: 969-976.

บทที่ 3

ผลของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดต่อลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของเนื้อเทียม

EFFECT OF SOY PROTEIN ISOLATE ON PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF MEAT ANALOG

3.1 บทคัดย่อ

การศึกษาผลของปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัด 20, 40, 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ที่ผสมกับแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน ในการแปรรูปเนื้อเทียมด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ พบว่าพันธะไดซัลไฟด์ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจนมีบทบาทในการเชื่อมโยงโครงสร้างของโปรตีนในผลิตภัณฑ์ การเพิ่มปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดจาก 20 เป็น 80 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณพันธะเคมีดังกล่าวที่เชื่อมโยงโครงสร้างระหว่างโมเลกุลโปรตีนในผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม ($p > 0.05$) แต่ส่งผลให้อัตราการขยายตัวของเนื้อเทียมเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) เนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมมีค่าความเครียดลดลง ($p < 0.05$) และทำให้เนื้อเทียมมีลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางด้านการฉีกได้ และความเป็นเส้นใยลดลง ($p < 0.05$) เมื่อทดสอบด้วยวิธี Quantitative Descriptive Analysis นอกจากนี้เมื่อตรวจสอบลักษณะโครงสร้างภายในของเนื้อเทียมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเนื้อเทียมที่เติมโปรตีนถั่วเหลืองสกัดในปริมาณน้อย มีช่องรูพรุนขนาดเล็กและขนาดใหญ่กระจายตัวอยู่ ผนังรูพรุนบางเรียบ ปรากฏริ้วเส้นใยเล็กและละเอียดที่ผนังของรูพรุน แต่เมื่อปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเพิ่มขึ้น โครงสร้างของเนื้อเทียมมีช่องรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น ผนังของรูพรุนหนาขรุขระไม่ต่อเนื่องและปรากฏลักษณะของเส้นใยลดลง

3.2 บทนำ

เนื้อเทียมเป็นผลิตภัณฑ์โปรตีนที่มีเนื้อสัมผัสเลียนแบบเนื้อสัตว์ ส่วนใหญ่ใช้โปรตีนถั่วเหลืองเป็นวัตถุดิบหลักในการแปรรูป จัดเป็นอาหารเพื่อสุขภาพที่เป็นแหล่งของโปรตีนและใยอาหาร (Mahungu, Diaz-Mercado, Schwerk, Singletary, and Faller, 1999) กระบวนการผลิตเนื้อเทียมด้วยกระบวนการหุงต้มแบบเอกซ์ทรูชัน (extrusion cooking) นั้นได้รับความนิยมมากที่สุด เพราะนอกจากผลิตภัณฑ์ที่ได้มีเนื้อสัมผัสคล้ายเนื้อสัตว์แล้ว ยังมีต้นทุนในการผลิตต่ำ

สามารถผลิตเนื้อเทียมได้อย่างต่อเนื่องในกระบวนการเดียว ทำให้ประหยัดทั้งเวลาและแรงงาน และสามารถแก้ไขปัญหารสชาติด้านโภชนาการในถั่วเหลืองได้ (Harper, 1981) เนื้อเทียมแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ เนื้อเทียมที่นำไปเป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์อาหาร (meat extender) ซึ่งสามารถนำไปเป็นส่วนประกอบของซอสที่มีส่วนผสมของเนื้อสัตว์ ใช้ในการทำสตูบรจกระป๋อง และเนื้อของแฮมเบอร์เกอร์ เป็นต้น (Lusas, 2004) และเนื้อเทียมที่ใช้ทดแทนเนื้อสัตว์ (meat analog) ที่มีลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส และความรู้สึกในปากคล้ายเนื้อสัตว์ (Harper, 1981; Endres, 2001; Salunkhe and Kadam, 1989) การแปรรูปเนื้อเทียมมีการใช้แป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน (defatted soy flour: DSF) และโปรตีนถั่วเหลืองเข้มข้น (soy protein concentrate: SPC) เป็นวัตถุดิบหลัก (Maurice and Stanley, 1978; Boison, Toranto, and Cheryan, 1983; Ning and Villota, 1994) และเติมโปรตีนถั่วเหลืองสกัด (soy protein isolate: SPI) เพื่อเพิ่มปริมาณโปรตีนและช่วยเพิ่มสมบัติเชิงหน้าที่ เพื่อให้เนื้อเทียมมีลักษณะทางโครงสร้างและเนื้อสัมผัสที่ดี (Sheard, Ledward, and Mitchell, 1984; Ha, 1992)

ลักษณะโครงสร้าง เนื้อสัมผัสและสมบัติเชิงหน้าที่ของเนื้อเทียมที่แปรรูปด้วยการเอกซ์ทรูชันได้รับผลกระทบจากปัจจัยทางด้านองค์ประกอบของวัตถุดิบ (Phillips and Finley, 1989) เมื่อปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นทำให้ผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเดตมีเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น และมีค่าของแรงเสียดทานมากขึ้น (Maurice and Stanley, 1978; Rhee, Kuo, and Lusas, 1981) โดย Leigh (1978) และ Kearns, Rokey และ Huber (1989) มีความเห็นที่สอดคล้องกันว่าในการแปรรูปเนื้อเทียมด้วยเอกซ์ทรูเดอรรุ่นนั้นควรมีปริมาณโปรตีนอย่างน้อย 50 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป นอกจากนี้ความสามารถในการดูดซับน้ำของคาร์โบไฮเดรตเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของเอกซ์ทรูเดต จากงานวิจัยของ Rhee และคณะ (1981) พบว่าคาร์โบไฮเดรตที่สามารถละลายได้ (soluble carbohydrate) ไม่มีบทบาทสำคัญต่อการเกิดโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ แต่อาจเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เข้าร่วมในปฏิกิริยา (non-enzymatic browning reaction) ซึ่งอาจส่งผลต่อคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์ (Phillips and Finley, 1989) Sheard และคณะ (1984) พบว่าคาร์โบไฮเดรตถั่วเหลืองมีส่วนช่วยสนับสนุนโครงสร้างของเอกซ์ทรูเดต โปรตีนถั่วเหลืองให้มีความเสถียรมากขึ้น ส่วนคาร์โบไฮเดรตที่ไม่สามารถละลายได้ (insoluble carbohydrate) อาทิเช่น โยอาหาร (dietary fiber) มีอิทธิพลต่อโครงสร้างภายในแบบโพรงอากาศ (air cell) ของผลิตภัณฑ์ โดย Lue, Hsieh, และ Huff (1991) พบว่าการเพิ่มปริมาณโยอาหารจากต้นบีท ทำให้การขยายตัวแนวรัศมีของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวโพดลดลงแต่มีการขยายตัวทางยาวเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่เติมโยอาหารในปริมาณที่ต่ำกว่า

โครงสร้างหลักที่เป็นเส้นใยแบบไฟเบอร์ (fiber) และเลเยอร์ (layer) ของเนื้อเทียมที่ให้ลักษณะคล้ายเนื้อสัตว์ เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนกับโปรตีน และระหว่างโปรตีนกับองค์ประกอบอื่นๆ ชนิดของพันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุลโปรตีนยังมีข้อโต้แย้งกันในรายละเอียดหลายประเด็นด้วยกัน โดยนักวิจัยบางท่านได้เสนอว่าพันธะไดซัลไฟด์ พันธะไฮโดรเจน และอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก มีส่วนสนับสนุนโครงสร้างภายในของผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเดตให้มีความเสถียร และไม่มีพันธะเคมีชนิดอื่นเกิดขึ้นระหว่างการเอกซ์ทรูชัน (Sheard et al., 1984; Hager, 1984) แต่ทั้งนี้ Hayakawa (1992) ได้เสนอประเด็นที่ว่าพันธะไดซัลไฟด์เกิดแตกแยกออกจากกันในระหว่างการแปรรูป จึงไม่น่ามีบทบาทสำคัญต่อโครงสร้างของผลิตภัณฑ์มากนัก ส่วนงานวิจัยของ Rhee และคณะ (1981) เสนอว่ามีพันธะไดซัลไฟด์เกิดขึ้นใหม่เมื่อผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาถึงผลของปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองที่มีต่อพันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุลโปรตีน ยังไม่มีการรายงานที่ชัดเจน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางพันธะเคมีในโครงสร้างของโปรตีนอาจส่งผลต่อโครงสร้างภายในของเนื้อเทียม ที่อาจทำให้ลักษณะทางเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของปริมาณ SPI ที่มีต่อพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างภายในและลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม

3.3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

3.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

นำแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน (DSF) และโปรตีนถั่วเหลืองสกัด (SPI) (Profam 970) จากบริษัท ADM Protein Specialties (Decatur, IL, USA.) มาผสมกันในอัตราส่วนโปรตีนถั่วเหลืองสกัด 20, 40, 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ (w/w) โดยมีปริมาณโปรตีนทั้งหมดของวัตถุดิบแต่ละสูตรดังแสดงในตารางที่ 3.1 เก็บวัตถุดิบและวัตถุดิบที่ผสมแล้วในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และทำการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมันและโปรตีนถั่วเหลืองสกัด ได้แก่ ความชื้น โปรตีน และไขมัน ด้วยวิธีของ AOAC (1995)

3.3.2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

หาช่วงระดับของสภาวะการแปรรูป คือ อัตราการป้อนวัตถุดิบ ความชื้น อุณหภูมิของบารเรล และความเร็วรอบสกรู ที่ทำให้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สามารถดำเนินไปได้ด้วยสภาวะคงที่ และสามารถนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไปโดยใช้ส่วนผสมของ DSF และ SPI เป็นวัตถุดิบในอัตราส่วน 70 ต่อ 30 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 3.1 ปริมาณโปรตีนของวัตถุดิบ 4 สูตร ที่มีส่วนผสมของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด 20-80 เปอร์เซ็นต์

Formula	DSF ⁽¹⁾ (%)	SPI ⁽²⁾ (%)	Total protein content (%)
1	80	20	58
2	60	40	66
3	40	60	74
4	20	80	82

(1) แป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน

(2) โปรตีนถั่วเหลืองสกัด

3.3.3 การแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

นำวัตถุดิบที่มีส่วนผสมของ DSF และ SPI มาป้อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่แบบที่หมุนตามกัน (APV Baker MPF 19:25, corotating intermeshing twin screw extruder, APV Baker, Peterborough, England) โดยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ประกอบด้วยสกรูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร และมีอัตราส่วนความยาวเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (L/D ratio) เท่ากับ 25:1 มีรูปแบบการจัดเรียงสกรู (screw configuration) ดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดยควบคุมอุณหภูมิของบารเรตตลอดความยาวในช่วงที่ 1 ถึง 4 ไว้ที่ 60, 90, 140 และ 160 องศาเซลเซียส ปลายบารเรตที่ส่วนของหัวแบบ (die plate) มีรูเปิดวงกลม (die hole) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตรซึ่งเป็นทางออกของผลิตภัณฑ์ ในกระบวนการแปรรูปใช้ความเร็วรอบสกรู 250 รอบต่อนาที ป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ผ่านทางถังใส่วัตถุดิบที่ได้ถังมีเกลียวสกรูคู่เป็นตัวป้อนวัตถุดิบแบบปริมาตร (K-Tron International, Piman, NJ, USA) ด้วยอัตราคงที่ 65 กรัมต่อนาที มีปั๊มน้ำชนิดที่มีการบีบตัวส่งน้ำเป็นระยะๆ (peristaltic pump) ที่ส่งน้ำเข้าไปผสมกับวัตถุดิบภายในบารเรตให้วัตถุดิบมีความชื้นเป็น 30 เปอร์เซ็นต์ ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่ได้นำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จนกระทั่งผลิตภัณฑ์มีความชื้นไม่เกิน 9 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และนำไปเก็บไว้ในห้องเย็นก่อนที่นำไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและทางเคมี

3.3.4 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design: CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลด้วยการวิเคราะห์วาเรียนซ์ (Analysis of variance: ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรม Statistical Analysis System (SAS) version 9.0

ตารางที่ 3.2 รูปแบบการจัดเรียงสกรู (เริ่มจากส่วนที่ป้อนวัตถุดิบถึงหน้าแปลน)

Screw element type	No. of screw
1.5D Feed screw	10
60° Forward paddles	6
1.5D Feed screw	2
30° Reverse paddles	7
1.0D Feed screw	1
30° Reverse paddles	7
1.0D Disch. single leed screw	1

3.3.5 การตรวจสอบลักษณะของผลิตภัณฑ์

3.3.6.1 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ

1) ลักษณะเนื้อสัมผัส

การตรวจเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (TA-XT2 Texture Analyzer; Stable Micro Systems, United Kingdom) โดยตัดชิ้นของเนื้อเทียมให้มีความยาว 3 ± 0.2 เซนติเมตร นำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที นำขึ้นจากน้ำ และวัดความชื้นด้วยเครื่องวิเคราะห์ความชื้น (MA40 Moisture Analyzer, Sartorius, Germany) ให้ตัวอย่างมีความชื้น 80 เปอร์เซ็นต์ และเก็บไว้ในภาชนะปิด วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างก่อนนำไปวัดค่าแรงตัด (cutting force) โดยวางตัวอย่างบนแท่นวางตัวอย่างและตัดตัวอย่างให้ขาดออกจากกันด้วยใบมีดแบบ Warner-Bratzler shear โดยกำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่ของใบ

มิต 2 มิลลิเมตรต่อวินาที เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสจะบันทึกค่าแรงที่ใบมีดใช้ในการตัดตัวอย่างให้ขาดออกจากกัน ทดสอบตัวอย่างแต่ละชนิด 15 ซ้ำ แล้วนำมาคำนวณค่าความเครียดดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{ความเครียด (g/cm}^2\text{)} = \frac{\text{แรงตัดตัวอย่าง}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง}}$$

2) ลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัส (Textural appearance)

ทดสอบลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม ด้วยวิธี Quantitative Descriptive Analysis โดยตัดชิ้นของเนื้อเทียมให้มีความยาว 5 ± 0.2 เซนติเมตร นำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที นำขึ้นมาผึ่งให้สะเด็ดน้ำและเก็บไว้ในภาชนะปิด เตรียมตัวอย่างใส่ภาชนะ แล้วนำไปให้ผู้ทดสอบทำการจิกตัวอย่างเนื้อเทียมออกตามแนวยาว แล้วสังเกตลักษณะการจิกได้และความเป็นเส้นใยที่ปรากฏภายในชิ้นเนื้อเทียม ซึ่งมีผลิตภัณฑ์ตัวอย่างจากห้องทดลองเป็นต้นแบบ โดยใช้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนมาแล้ว 10 คน และทำซ้ำ 3 ครั้ง

3) อัตราการขยายตัว

วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างและรูเปิดที่หัวแบบ แล้วคำนวณอัตราการขยายตัวของผลิตภัณฑ์เป็นค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 20 ตัวอย่าง คำนวณค่าอัตราการขยายตัวตามสมการต่อไปนี้

$$\text{อัตราการขยายตัว} = \frac{\text{เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง}}{\text{เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเปิดที่หัวแบบ}}$$

4) ลักษณะโครงสร้างภายใน (Microstructure)

ตัดเนื้อเทียมหลังอบแห้งออกเป็นชิ้นบาง ที่มีความกว้าง 0.4 เซนติเมตร ยาว 0.6 เซนติเมตร และหนา 0.2 เซนติเมตร วางตัวอย่างให้ติดแน่นบนแท่นวางตัวอย่าง (stub) แล้วเคลือบตัวอย่างด้วยทองที่ 10 mA เป็นเวลา 3 นาที ด้วยเครื่อง Sputter coated (JFC-110E Ion Sputtering Device, Japan) ศึกษาโครงสร้างภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (JSM-6400, Scanning electron microscope, JEOL, Japan) ที่มีการเร่งอิเล็กตรอนด้วยความต่างศักย์ (accelerating voltage) 8 KV และถ่ายภาพตามขวางของตัวอย่างที่กำลังขยาย 17 เท่า และถ่ายภาพตามยาวที่กำลังขยาย 120 เท่า

3.3.6.2 การตรวจสอบสมบัติทางเคมี

1) ความสามารถในการละลายของโปรตีน (protein solubility)

วิเคราะห์ความสามารถในการละลายของโปรตีน จากวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการสกัดโปรตีนด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ตามวิธีของ Lin, Huff และ Hsieh (2000) เตรียมสารตัวทำละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 8 ชนิด ได้แก่ (1) สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.035 โมลาร์ pH 7.6 (P) (2) สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (sodium dodecyl sulphate) ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์ pH 7.6 (P+SDS) (3) สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มียูเรีย (urea) ความเข้มข้น 8 โมลาร์ pH 7.6 (P+Urea) (4) สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีเมอแคปโทเอทานอล (2-mercaptoethanol) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ pH 7.6 (P+ME) (5) สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มียูเรียความเข้มข้น 8 โมลาร์ และโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์ pH 7.6 (P+U+S) (6) สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์ และเมอแคปโทเอทานอล ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ pH 7.6 (P+S+M) (7) สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มียูเรีย ความเข้มข้น 8 โมลาร์ และเมอแคปโทเอทานอล ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ pH 7.6 (P+U+M) (8) สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์ ยูเรีย ความเข้มข้น 8 โมลาร์ และเมอแคปโทเอทานอล ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ pH 7.6 (P+S+U+M) บดตัวอย่าง 200 กรัม ให้ละเอียดด้วยเครื่องบดเป็นเวลา 1 นาที วัดความชื้นของตัวอย่างก่อนการสกัด ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 2 กรัมใส่ในขวดรูปชมพู่แล้วเติมบัฟเฟอร์ปริมาตร 40 มิลลิลิตร นำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (shaking water bath) เขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 20000 g เป็นเวลา 40 นาที และวัดความเข้มข้นของโปรตีนที่ละลายได้ด้วยวิธี Lowry method

2) การวัดความเข้มข้นของโปรตีนด้วยวิธี Lowry method

วัดปริมาณโปรตีนตามวิธีการของ Lowry และคณะ (1951) โดยใช้สารละลายตัวอย่างจำนวน 100 ไมโครลิตร ในหลอดทดลอง เติมสารที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ปั่นผสม และตั้งทิ้งไว้ประมาณ 40 นาที อ่านค่าการดูดกลืนแสงที่ 750 นาโนเมตร พล็อตกราฟความเข้มข้นของโปรตีนมาตรฐาน จากสารละลายโบวีน ซีรัม อัลบูมิน (bovine serum albumin solution) ที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

3.4 ผลการทดลองและการวิจารณ์

3.4.1 ผลการศึกษาเบื้องต้น

จากการศึกษาสภาวะเบื้องต้นเพื่อหาช่วงระดับในการแปรรูปของเครื่องเอกซทรีเตอร์ โดยใช้วัตถุดิบที่เป็นส่วนผสมระหว่าง DSF และ SPI ในอัตราส่วน 70 ต่อ 30 เปอร์เซ็นต์ พบว่าที่อัตราการป้อนวัตถุดิบ 65 กรัมต่อนาที ความชื้นของวัตถุดิบ 30 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วรอบสกรู 250 รอบต่อนาที และอุณหภูมิของบารเรลช่วงที่ 1 ถึงช่วงที่ 4 เป็น 60, 90, 140 และ 160 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม สามารถดำเนินเครื่องเอกซทรีเตอร์ได้อย่างราบรื่น ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่ได้มีลักษณะทางกายภาพที่ดี ผิวหน้าเรียบ เอกซทรีเตอร์เกิดการขยายตัวเมื่อผ่านออกจากหน้าแปลน

3.4.2 ผลของปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดต่อพันธะเคมี

การศึกษาความสามารถในการละลายของโปรตีนในตัวทำละลายบางชนิด สามารถบ่งชี้ถึงชนิดของพันธะเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของโปรตีน (intermolecular chemical linkages) และพันธะเคมีภายในโมเลกุลโปรตีน (intramolecular chemical linkages) ได้ โดยสารเคมีที่นำมาใช้ได้แก่ ยูเรีย โซเดียมโคเคซิลซัลเฟต และเมอแคปโทเอทานอล ซึ่งสามารถทำลายพันธะไฮโดรเจน แร็งคิงดูคไฮโดรโฟบิก และพันธะไดซัลไฟด์ระหว่างโมเลกุลของโปรตีนได้ตามลำดับ จากการศึกษาชนิดพันธะเคมีที่เชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลโปรตีนในเนื้อเทียม พบว่าพันธะไดซัลไฟด์ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจนเป็นพันธะเคมีที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของโปรตีนในเนื้อเทียม ซึ่งเห็นได้ในตารางที่ 3.3 ที่พบว่าเนื้อเทียมที่มี SPI เป็นส่วนผสมที่ระดับ 20, 40, 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ใน P+S+M และ P+U+M มีค่าสูงกว่าปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ชนิดอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ในบัฟเฟอร์ชนิดอื่นๆ ของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมทุกชนิด มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) แสดงว่าทั้งพันธะไดซัลไฟด์ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจน เป็นพันธะที่มีบทบาทต่อการเกิดโครงสร้างในเนื้อเทียม ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Hager (1984) และ Prudêncio-Ferreira และ Arêas (1993) ที่พบว่าพันธะไดซัลไฟด์ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต เป็นพันธะทางเคมีที่มีส่วนสนับสนุนโครงสร้างของโปรตีนถั่วเหลืองในเอกซทรีเตอร์ที่ผ่านเอกซทรีชัน นอกจากนี้ยังพบว่าพันธะเคมีที่พบในโมเลกุลโปรตีนของวัตถุดิบเป็นพันธะเคมีชนิดเดียวกันกับพันธะเคมีที่เชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลโปรตีนในเนื้อเทียม ได้แก่ พันธะไดซัลไฟด์ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจน ซึ่งสังเกตได้จากวัตถุดิบทุกชนิดมีปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ใน P+Urea,

ตารางที่ 3.3 ปริมาณ ไพรตินที่ละลายได้ (กรัม/กรัม ไพรติน) ของเนื้อเทียมที่มีไพรตินถั่วเหลืองสกัด 20-80 เปอร์เซ็นต์ ในตัวทำละลาย 7 ชนิด

SPI content /Buffer	P ⁽¹⁾	P+SDS ⁽²⁾	P+Urea ⁽³⁾	P+ME ⁽⁴⁾	P+S+U ⁽⁵⁾	P+S+M ⁽⁶⁾	P+U+M ⁽⁷⁾
20%SPI	0.0816xy ⁽⁸⁾ , Y ⁽⁹⁾	0.1687 Y	0.2949 Y	0.2462 Y	0.2085 Y	0.7994 X	0.7198 X
40%SPI	0.0817xy, Y	0.2107 Y	0.1723 Y	0.1794 Y	0.1705 Y	0.8367 X	0.7952 X
60%SPI	0.1172x, Y	0.2816 Y	0.2406 Y	0.2512 Y	0.1352 Y	1.0184 X	1.0122 X
80%SPI	0.0540y, Y	0.1369 Y	0.1668 Y	0.1886 Y	0.1051 Y	0.6307 X	0.7117 X

⁽¹⁾หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

⁽²⁾ หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีโซเดียมโคเคซิลซัลเฟต

⁽³⁾หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มียูเรีย

⁽⁴⁾หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีเมอแคปโทเอธานอล

⁽⁵⁾หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มียูเรียและโซเดียมโคเคซิลซัลเฟต

⁽⁶⁾หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มี โซเดียมโคเคซิลซัลเฟตและเมอแคปโทเอธานอล

⁽⁷⁾หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มียูเรีย และเมอแคปโทเอธานอล

⁽⁸⁾ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

⁽⁹⁾ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ตารางที่ 3.4 ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ (กรัม/กรัม โปรตีน) ของวัตถุดิบที่มีโปรตีนถั่วเหลืองสกัด 20-80 เปอร์เซ็นต์ ในตัวทำละลาย 7 ชนิด

SPI content /Buffer	P	P+SDS	P+Urea	P+ME	P+S+U	P+S+M	P+U+M
20%SPI	0.4542 C ⁽¹⁾	0.7473 ABC	0.7168ABC	0.5621 BC	0.7466a ⁽²⁾ , ABC	0.9888 A	0.8932 AB
40%SPI	0.4581 B	0.8128 A	0.7549 A	0.6780 AB	0.6406ab, AB	0.8776 A	0.8982 A
60%SPI	0.4472 B	0.7695 AB	0.8467 AB	0.6875 AB	0.6276ab, AB	1.0058 A	0.9503 A
80%SPI	0.3255 B	0.6231 AB	0.7006 AB	0.5900 AB	0.4431b, AB	0.8664 A	0.7974 A

⁽¹⁾ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันตามแนวนอน หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

⁽²⁾ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

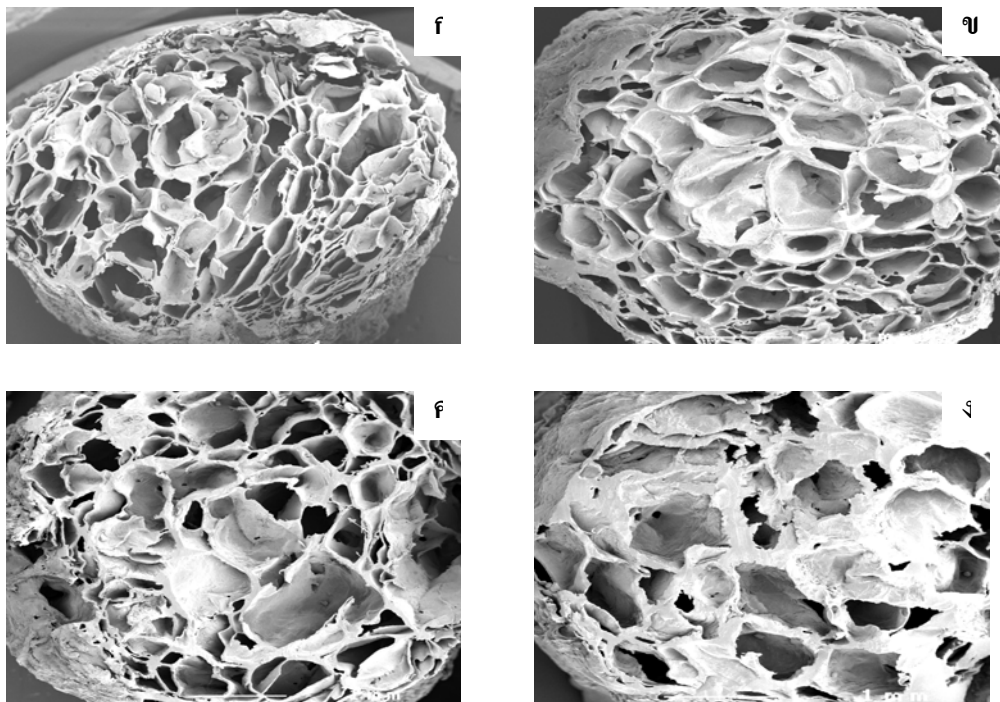
P+SDS, P+ME และ P+S+U ที่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 3.4 แสดงให้เห็นว่าการเอกซ์ทรูชันไม่มีผลเปลี่ยนแปลงชนิดของพันธะเคมีในผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมให้แตกต่างไปจากวัตถุดิบ

เมื่อศึกษาผลของปริมาณ SPI ต่อการสร้างพันธะเคมีในเนื้อเทียม ดังแสดงในตารางที่ 3.3 บ่งชี้ว่าการเพิ่มปริมาณ SPI ในเนื้อเทียม ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับของพันธะเคมีที่เชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลโปรตีน ได้แก่ พันธะไดซัลไฟด์ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างของโปรตีนที่แตกต่างไปจากเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของ SPI ในปริมาณต่ำ โดยพิจารณาจากเนื้อเทียมที่มี SPI เพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 80 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ส่วนใหญ่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) แสดงว่าปริมาณโปรตีนที่เพิ่มขึ้นจาก 58 เป็น 82 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของพันธะเคมีทุกชนิดระหว่างโมเลกุลโปรตีนในโครงสร้างหลักของเนื้อเทียม นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณ SPI ไม่มีผลต่อการเพิ่มพันธะเคมีภายในโมเลกุลโปรตีนของวัตถุดิบ โดยเมื่อวัตถุดิบมีปริมาณ SPI เพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 80 เปอร์เซ็นต์ ไม่ส่งผลให้ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ส่วนใหญ่ มีค่าแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 3.3 แสดงว่าปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อระดับพันธะเคมีที่เชื่อมโยงในโมเลกุลโปรตีนในวัตถุดิบ

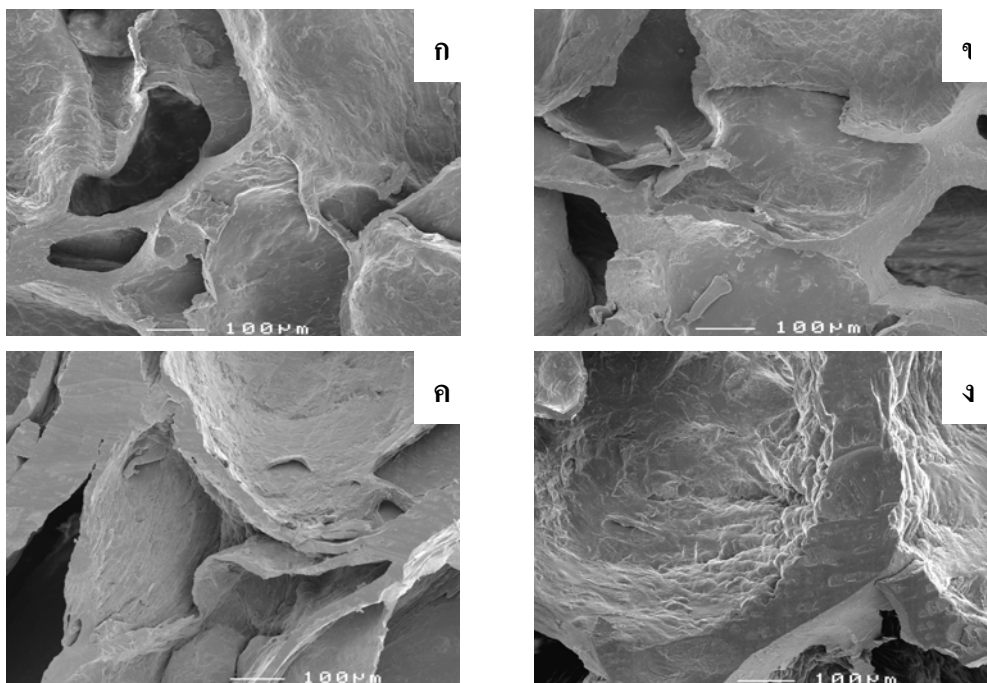
จากผลการทดลองในตารางที่ 3.3 พบว่าปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่มีปริมาณ SPI ที่ระดับ 20, 40, 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ มีค่าต่ำกว่าของวัตถุดิบที่มี SPI ในระดับเดียวกัน (ตารางที่ 3.4) เมื่อสกัดด้วย P, P+SDS, P+Urea, P+ME, P+S+U อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่โปรตีนที่สูญเสียสภาพทางธรรมชาติมาจัดเรียงตัวในรูปแบบใหม่เกิดเป็นโครงสร้างโปรตีนที่มีความซับซ้อนมากกว่าเดิม (Smith, 1982) ส่งผลให้ความสามารถในการละลายของโปรตีนในสารตัวทำละลายลดลง ซึ่งทำให้ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมมีค่าลดลง (Jeunink, and Cheftel, 1979; Noguchi, Kugimiya, Haque, and Saio, 1981) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Lin และคณะ (2000) ที่รายงานว่า การเอกซ์ทรูชันของโปรตีนถั่วเหลืองอาจเกิดโพลิเมอร์มวลโมเลกุลสูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการละลายของโปรตีนลดลง แต่ทั้งนี้พบว่าปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ของเนื้อเทียมแต่ละสูตรที่สกัดด้วย P+S+M และ P+U+M มีค่าไม่แตกต่างทางสถิติกับของวัตถุดิบ ($p>0.05$)

3.4.3 ผลของปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดต่อลักษณะโครงสร้างภายใน

จากการศึกษาโครงสร้างภายในของขึ้นเนื้อเทียม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่แสดงในภาพที่ 3.1 ก-ง และภาพที่ 3.2 ก-ง พบว่าเนื้อเทียมที่เติม SPI 20 เปอร์เซ็นต์ ในภาพที่ 3.1 ก มีลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างแบบชั้นวงคล้ายรังผึ้ง (honeycomb structure) ที่มีช่องรูพรุนขนาดเล็กและใหญ่กระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอ ผนังรูพรุนบาง ผิวเรียบสม่ำเสมอและไม่ขรุขระ ที่ผิวหน้าของช่องรูพรุนปรากฏริ้วเส้นใยเล็กๆที่ละเอียด ซึ่งเห็นได้จากภาพที่ 3.2 ก การเติม SPI ในวัตถุดิบเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของเอกซ์ทรูเดต โดยทำให้ลักษณะการจัดเรียงตัวเป็นชั้นวงคล้ายรังผึ้งภายในโครงสร้างของขึ้นเนื้อเทียมเปลี่ยนแปลงไป โดยพบว่าโครงสร้างภายในของเนื้อเทียมที่มีปริมาณ SPI เพิ่มขึ้นเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ มีจำนวนรูพรุนลดลง ขนาดของช่องรูพรุนใหญ่ขึ้น และเกิดลักษณะโครงสร้างคล้ายฟองน้ำ (spongy-like structure) ผนังของรูพรุนหนาขึ้นมากผิวหน้าไม่เรียบขรุขระและเว้าแหว่งมากขึ้น ดังภาพที่ 3.1 ง และมีลักษณะของเส้นใยเล็กๆ ที่ผิวหน้าของช่องรูพรุนน้อยดังภาพที่ 3.2 ง ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับผลงานวิจัยของ Sheard และคณะ (1984) ที่พบว่าเอกซ์ทรูเดตของ DSF มีโครงสร้างภายในคล้ายรังผึ้งที่มีรูปร่างและการกระจายตัวของโพรงอากาศ (air cell) เป็นปกติและสม่ำเสมอมากกว่าเอกซ์ทรูเดตของ SPI แสดงว่าปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองมีผลต่อลักษณะโครงสร้างภายในของเนื้อเทียมโดย Harper (1981) รายงานว่าเมื่อโมเลกุลของโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และอนุภาคขององค์ประกอบอื่นๆ ได้รับความร้อน และความดันในกระบวนการเอกซ์ทรูชัน จะเกิดการแตกแยกตัวออกจากโครงสร้างและมาจัดเรียงตัวในสภาวะแรงเฉือน ทั้งนี้โมเลกุลสายยาวของโปรตีนที่มาเรียงตัวต่อเนื่องกันนั้น ก่อให้เกิดลักษณะโครงสร้างร่างแหแบบตาข่าย 3 มิติขึ้น (three dimension protein matrix structure) ซึ่งจัดเป็นโครงสร้างหลักของผลิตภัณฑ์ที่พบในรูปแบบของเส้นใยที่มีช่องรูพรุนกระจายตัวอยู่ และจากการศึกษาโครงสร้างภายในของเอกซ์ทรูเดตของ Kazemzadeh, Aguilera และ Rhee (1982) ด้วยการส่องดูโมเลกุลของโปรตีน และคาร์โบไฮเดรตที่ผ่านการย้อมสีด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง พบว่าโมเลกุลสายยาวของโปรตีนปิดล้อมช่องว่างในโครงสร้างที่เป็นผลจากการดันตัวออกของไอน้ำ โดยที่คาร์โบไฮเดรตฝังตัวอยู่ในโครงสร้างแบบร่างแหของโปรตีนที่เป็นเส้นใย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Noguchi (1989) ที่ตรวจสอบโครงสร้างของเอกซ์ทรูเดตของเนื้อปลาซมแซลมอน (chum salmon muscle) และเป็งสาลี โดยการย้อมสีโปรตีนและคาร์โบไฮเดรต ด้วย Coomassie Brilliant Blue และ Periodic Acid Schiff Reagent แล้วส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง พบว่ากระบวนการเอกซ์ทรูชันส่งผลให้โมเลกุลโปรตีนเกิดจัดเรียงตัวในทิศทางตามแนวยาวของบารล โดยเกิดเป็นโครงสร้างเส้นใยร่างแหคล้ายกล้ามเนื้อสัตว์



ภาพที่ 3.1 ภาพถ่ายตามขวาง ที่กำลังขยาย 17 เท่า (ก, ข, ค,ง) ของเนื้อเทียมที่เติม SPI ที่ระดับ 20, 40, 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 3.2 ภาพถ่ายตามยาวที่กำลังขยาย 120 เท่า (ก, ข, ค,ง) ของเนื้อเทียมที่เติม SPI ที่ระดับ 20, 40, 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ส่วนสสารซึ่งได้กระจายตัวตามโครงสร้างแบบร่างแหของโปรตีน โดยที่ไม่ได้เข้าร่วมเป็นส่วนหนึ่งของเส้นใยของโปรตีน แต่เกิดเป็นลักษณะของเฟสสองเฟสที่แยกตัวออกจากกันอย่างสิ้นเชิง แสดงให้เห็นว่าการที่โปรตีนถั่วเหลืองสูญเสียสภาพดั้งเดิมจากลักษณะโปรตีนแบบก้อนกลม เกิดการคลายตัวออกเป็นโมเลกุลสายยาวมาเรียงตัวใกล้ชิดกัน ซึ่งกลายเป็นโครงสร้างหลักของเนื้อเทียม ส่วนคาร์โบไฮเดรตถั่วเหลืองที่เกิดการหลอมละลายได้กระจายตัวไปเกาะตามส่วนต่างๆ ของโครงสร้างหลักของเนื้อเทียม

3.4.4 ผลของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดต่อลักษณะทางกายภาพ

เมื่อปริมาณ SPI เพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 80 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้เนื้อเทียมมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นมากซึ่งแสดงในตารางที่ 3.5 เนื้อเทียมที่เติม SPI ในระดับ 80 เปอร์เซ็นต์ มีอัตราการขยายตัวสูงสุด ($p < 0.05$) เมื่อปริมาณ SPI ลดลง ส่งผลให้อัตราการขยายตัวของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมมีค่าลดลง แสดงว่าองค์ประกอบในวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเนื้อเทียมส่งผลต่ออัตราการขยายตัวของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมเป็นอย่างมาก จากการศึกษาของ Yuryev, Zasyplin, Alexeev และ Bogatyryev (1995) พบว่าการสูญเสียโครงสร้างของเฟสกระจายเนื่องจากความเครียดของการเฉือนในระหว่างการไหลภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ส่งผลกระทบต่อความหนืดและความยืดหยุ่นของระบบซึ่งมีบทบาทต่ออัตราการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน โดย Tolstoguzov, Grinberg และ Gurov (1985) และ Tolstoguzov (1993) กล่าวว่าในระบบของเอกซ์ทรูชันที่ประกอบด้วยโมเลกุลที่มีโครงสร้างแบบโพลีเมอร์ขนาดใหญ่หลายชนิดมาอยู่ร่วมกัน ก่อให้เกิดลักษณะโครงสร้างแบบที่ไม่สามารถอยู่ร่วมกันได้ (incompatibility) จึงแยกตัวออกจากกันกลายเป็นระบบที่มีหลายเฟสอย่างชัดเจน องค์ประกอบที่มีอิทธิพลสูงจะกระทำตัวเป็นเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) ที่แสดงบทบาทของโครงสร้างหลักของผลิตภัณฑ์ ส่วนองค์ประกอบอื่นๆ ที่มีปริมาณน้อยกว่า กลายเป็นเฟสกระจาย (disperse phase) ที่อยู่ตามส่วนต่างๆ ของโครงสร้างหลัก ซึ่งส่งผลต่อลักษณะโดยรวมของผลิตภัณฑ์ร่วมกัน ดังนั้นในการเอกซ์ทรูชันของเนื้อเทียมที่มีโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตของถั่วเหลืองเป็นองค์ประกอบนั้น พบว่าโปรตีนถั่วเหลืองมีบทบาทต่อความหนืดและความยืดหยุ่นของโด เนื่องจากโปรตีนถั่วเหลืองเป็นโพลีโพลีเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เมื่อเกิดการสูญเสียสภาพทางธรรมชาติ จึงคลายตัวออกเป็นโปรตีนที่มีโมเลกุลแบบสายยาว เมื่อเกาะตัวรวมตัวกันจึงขยับน้ำออกจากโครงสร้าง ทำให้ความหนืดของระบบลดลง แต่ส่งผลให้ความยืดหยุ่นของโดเพิ่มขึ้น (นิธิยา รัตนานพนธ์, 2543) ส่วนคาร์โบไฮเดรตของแป้งถั่วเหลืองส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลที่ละลายน้ำได้ จึงช่วยเพิ่มความหนืด แต่ไม่มีส่วนช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่โด เนื่องจากโมเลกุลคาร์โบไฮเดรตของถั่วเหลืองมีขนาดเล็ก จึงพบว่าเนื้อเทียมที่มี

SPI ในปริมาณต่ำมีค่าทอร์คและความดันที่หัวแบบสูง ($p < 0.05$) (ตารางที่ 3.5) จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเนื้อเทียมที่มี SPI ในปริมาณสูงเป็นส่วนผสม มีอัตราการขยายตัวสูงมาก แสดงว่าโปรตีนถั่วเหลืองส่งเสริมให้โดของเนื้อเทียมมีสมบัติด้านความยืดหยุ่นสูง แต่มีความหนืดในระบบต่ำ ซึ่งสังเกตได้จากการที่ค่าทอร์คและความดันที่หัวแบบของเนื้อเทียมที่มี SPI ในระดับ 80 เปอร์เซ็นต์ มีค่าต่ำมาก ($p < 0.05$) ส่งผลให้โดของเนื้อเทียมสามารถขยายตัวออกจากกันได้มาก หลังผ่านหัวแบบออกสู่ภายนอก ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Rhee และคณะ (1981) พบว่าเนื้อเทียมที่มีปริมาณ SPI เพิ่มขึ้น มีความหนาแน่นจำเพาะลดลงเนื่องจากเนื้อเทียมมีการขยายตัวเพิ่มขึ้น และ Bhattacharya และ Hanna (1988) พบว่าเมื่อเติมโปรตีนถั่วเหลืองเข้มข้นในกนูเดนข้าวโพดในปริมาณมากขึ้น ทำให้เอกซ์ทรูเดตมีอัตราการขยายตัวสูงขึ้น ส่วนเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของ SPI ในปริมาณต่ำมีอัตราการขยายตัวต่ำ เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนน้อย และอาจเป็นผลมาจากคาร์โบไฮเดรตถั่วเหลืองที่มีอยู่ในวัตถุดิบเกิดการหลอมละลายเนื่องจากได้รับความร้อนและความชื้น จึงกระจายตัวตามไปเกาะตามโครงสร้างแบบร่างแหของโปรตีน ทำให้โมเลกุลของโปรตีนถูกยึดติดเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งอาจไปขัดขวางการยืดขยายตัวของโปรตีน จนทำให้ความยืดหยุ่นของโดลดลง และส่งผลให้อัตราการขยายตัวของเนื้อเทียมลดลง

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรของกระบวนการเอกซ์ทรูชันและลักษณะทางกายภาพของเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด ในระดับ 20-80 เปอร์เซ็นต์

Extrusion parameters and Characteristics	Soy protein isolate (%)			
	20	40	60	80
Torque (%)	30.00ab ⁽¹⁾	36.00a	35.00ab	28.33b
Die pressure (psi)	183.33a	193.33a	196.67a	116.67b
Expansion ratio	2.01d	2.25c	2.36b	2.62a
Stress (g/cm ²)	2,477a	2,186ab	2,035b	1,446c
Textural appearance score				
-Tearing	6.60a	4.55b	2.03c	1.38c
-Fibrousness	5.36a	3.85b	1.98c	1.30c

⁽¹⁾ ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวนอนหมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เมื่อศึกษาผลของปริมาณ SPI ต่อการสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียม โดยการวัดความเครียดของเนื้อเทียม ซึ่งคำนวณมาจากแรงที่ใช้ในการตัดเนื้อเทียมให้ขาดออกจากกันต่อพื้นที่หน้าตัดของเนื้อเทียม จึงสามารถใช้แสดงถึงความแข็งแรงของเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียม โดยวัด

ความเครียดของเนื้อเทียมที่มีความชื้น 80 เปอร์เซ็นต์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสโดยใช้หัววัดแบบ Warner-Bratzler shear cell ดังแสดงในตารางที่ 3.5 พบว่าเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมที่เติม SPI ในระดับ 20 เปอร์เซ็นต์ มีความเครียดสูงสุด ($p < 0.05$) แสดงว่าเนื้อเทียมมีเนื้อสัมผัสที่แข็งแรง เมื่อเติม SPI เพิ่มขึ้นทำให้เนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมมีความเครียดลดลง เป็นผลมาจากการที่เนื้อเทียมที่มีปริมาณ SPI สูง มีอัตราการขยายตัวสูง (ตารางที่ 3.5) เนื้อเทียมเกิดการขยายตัวออกจากกันในแนวรัศมีมาก มีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 3.1 ง โครงสร้างของเนื้อเทียมเกาะตัวกันอย่างหลวมๆ และไม่แน่นอนหนา ส่งผลให้เนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมที่มีปริมาณ SPI สูงมีความแข็งแรงน้อย ส่วนเนื้อเทียมที่มี SPI เป็นส่วนผสมในปริมาณต่ำเกิดการขยายตัวน้อย เนื่องจากมีโปรตีนที่ให้สมบัติในการยึดขยายตัวในปริมาณน้อย และมีคาร์โบไฮเดรตไปตรึงโครงสร้างของโปรตีนไว้ไม่ให้ขยายตัวออก โครงสร้างของผลิตภัณฑ์จึงเกาะตัวอยู่ใกล้ชิดกัน ทำให้เนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมที่มีโปรตีนต่ำเหลือสัมผัสมีความแน่นจึงมีความแข็งแรงสูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sheard และคณะ (1984) ที่รายงานว่าเอกซ์ทรูเดตจาก DSF มีความแข็งแรงและเสถียรมากกว่าเอกซ์ทรูเดตของ SPI แต่ขัดแย้งกับผลการวิจัยของ Kazemzadeh, Diehl, Rhee และ Dahm (1986) ที่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ SPI ในช่วง 40-70 เปอร์เซ็นต์ ทำให้แรงที่กระทำต่อเอกซ์ทรูเดตมีค่าเพิ่มขึ้น

จากการตรวจสอบลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียม โดยศึกษาลักษณะการฉีกได้และความเป็นเส้นใยของเนื้อเทียมด้วยผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนแล้ว พบว่าการเติม SPI ในระดับ 20 เปอร์เซ็นต์ ให้เนื้อเทียมที่มีลักษณะฉีกได้และความเป็นเส้นใยสูงที่สุด ($p < 0.05$) ดังตารางที่ 3.5 เนื้อเทียมที่เติม SPI ในปริมาณมากขึ้น ทำให้ลักษณะการฉีกได้และความเป็นริ้วเส้นใยลดลงมาก ($p < 0.05$) ซึ่งอาจเป็นผลจากเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของ SPI ในปริมาณมากขึ้น มีอัตราการขยายตัวสูง เกิดช่องรูพรุนขนาดใหญ่ในโครงสร้าง จึงขัดขวางการจัดเรียงตัวแบบเส้นใยของโมเลกุลโปรตีน ทำให้ไม่สามารถฉีกเนื้อเทียมออกจากกันตามแนวยาวได้ นอกจากนี้อาจเป็นผลจากทอร์คและความดันของโดในระหว่างเอกซ์ทรูชันมีค่าต่ำ โดย Lin และคณะ (2002) พบว่าการที่ทอร์คและความดันที่หัวแบบภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์มีค่าน้อย อาจไม่เพียงพอต่อการสร้างโครงสร้างแบบเส้นใยของเนื้อเทียม เนื่องจากค่าทอร์ค และความดันที่หัวแบบของโดเป็นตัวแปรทางกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่เกี่ยวข้องกับความหนืดของโดในระบบ การที่ความหนืดของโดสูงขึ้นต้องใช้แรงทอร์คในการหมุนสกรูให้ขับเคลื่อนสูงขึ้น และเมื่อโดที่มีความหนืดสูงเคลื่อนผ่านรูเปิดที่หัวแบบออกสู่ภายนอกเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ จะทำให้ความดันที่หัวแบบสูงตามไปด้วย ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าโดของเนื้อเทียมที่เติม SPI ในปริมาณที่สูงขึ้น มีความหนืดลดลง ทำให้ทอร์คและความดันที่หัวแบบต่ำ จึงส่งผลให้เนื้อเทียมมีโครงสร้างแบบเส้นใยลดลง

3.5 สรุปผลการทดลอง

กระบวนการเอกซ์ทรูชันได้ทำลายพันธะเคมีภายในโมเลกุลโปรตีนของวัตถุดิบ แล้วจึงเกิดการเชื่อมโยงด้วยพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลโปรตีนขึ้นใหม่เมื่อมีการสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมขึ้นได้แก่ พันธะไดซัลไฟด์ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเป็นพันธะเคมีที่มีบทบาทสำคัญต่อโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ การเติมโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเพิ่มขึ้นจาก 20 เปอร์เซ็นต์ เป็น 80 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีผลต่อการเพิ่มพันธะเคมีดังกล่าวในผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม แต่มีผลทำให้เนื้อเทียมมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้น ปรากฏลักษณะโครงสร้างภายในแบบหลวมๆ ที่มีช่องรูพรุนขนาดใหญ่และไม่หนาแน่น จึงส่งผลให้ความเครียดของเนื้อเทียมลดลง และมีลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางการฉีกได้และความเป็นเส้นใยของเนื้อเทียมลดลง ส่วนเนื้อเทียมที่มีปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดต่ำมีลักษณะการจัดเรียงตัวแบบเส้นใยยาวต่อเนื่อง ซึ่งปรากฏชั้นวงของช่องรูพรุนที่สม่ำเสมอ ดังนั้นปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ทำให้เนื้อเทียมเกิดลักษณะโครงสร้างแบบเส้นใยของที่มีความแข็งแรงคือ 20 เปอร์เซ็นต์

3.6 เอกสารอ้างอิง

- Boison, G., Taranto, M.V. and Cheryan, M. (1983). Extrusion of defatted soy flour-hydrocolloid mixtures: Effect of operating parameters of selected textural and physical properties. **J. Food Technol.** 18: 719-730.
- Conway, H.F. and Anderson, R.A. (1973). Protein-fortified extruded food products. **Cereal Sci. Today.** 18(4): 94-97.
- Endres, J. G. (2001). **Soy protein products. Characteristics, nutritional aspects and utilization.** AOCS Press: USA.
- Garcia, M.C., Torre, M., Marina, M. L., and Laborda, F. (1997). Composition and characterization of soybean and related products. **Criti. Rev. Food Sci. Nutri.,** 37 (4): 361-391.
- Hager, D.F. (1984). Effects of extrusion upon soy concentrate solubility. **J. of Agric. Food Chem.** 32: 293-296.

- Harper, J.M. (1981). **Extrusion of foods. Vol. II.** CRC Press: Boca Raton, Florida, USA.
- Hayakawa, I. (1992). **Food processing by ultra high pressure twin screw extrusion.** Technomic Publishing: USA.
- Jeunink, J. and Cheftel, J.C. (1979). Chemical and physicochemical change in field bean and soybean protein texturized by extrusion. **J. Food Sci.** 44: 1322-1328.
- Kazemzadeh, M., Aguilera, J.M., and Rhee, K.C. (1982). Use of microscopy in the study of vegetable protein texturization. **Food Tech.** 36(4): 111-117.
- Kazemzadeh, M., Diehl, K.C. JR., Rhee, K. C. and Dahm, P.F. (1986) Mechanical and structural evaluation of texturized soy proteins of varying protein content. **Cereal Chem.** 63(4): 304-310.
- Leigh, J.S. (1978). **Extrusion texturization of whole soybean for use in meat analogs.** Ph.D. Dissertation. University of Illinois at Urbana-Champaign: USA.
- Lin, S., Huff, H.E. and Hsieh, F. (2000). Texture and chemical characteristics of soy protein meat analog extruded at high moisture. **J. of Agric. Food Chem.** 65(2): 264-269.
- Lin, S., Huff, H.E. and Hsieh, F. (2002). Extrusion process parameters, sensory characteristics, and structural properties of high moisture soy protein meat analog. **J. Food Sci.** 67(3): 1066-1072.
- Liu, K. (1997). **Soybeans: chemistry, technology, and utilization.** Chapman and Hall: New York, USA.

- Lowry, O.H., Rosebrough, N.J., Farr, A.L. and Randall, R.J. (1951). Protein measurement with the Folin phenol reagent. **J. Biol. Chem.** 193: 256-275.
- Lue, S., Hsieh, F. and Huff, H.E. (1991). Extrusion cooking of corn meal and sugar beet fiber content. **Cereal Chem.** 68(3): 227-234.
- Mahungu, S.M., Diaz- Mercado, S., Schwenk, L. M., Singletary, K. and Faller, J. (1999). Stability of isoflavones during extrusion processing of corn/soy mixture. **J. of Agric. Food Chem.** 47: 279-284.
- Maurice, T.J. and Stanley, D.W. (1978). Texture-structure relationships in texturized soy protein IV. Influence of process variables on extrusion texturization. **J. Ints. Can. Sci. Technol. Aliment.** 11: 1-6.
- Ning, L. and Villota, R. 1994. Influence of 7S and 11S globulins on the extrusion performance of soy protein concentrate. **J. Food Proc. and Pres.** 18: 421-436.
- Noguchi, A. (1989). Extrusion cooking of high-moisture protein foods. In C. Mercier, P. Linko, and J.M. Harper (eds.), **Extrusion cooking**. pp. 343-370. American Association of Cereal Chemists: St. Paul, Minn., USA.
- Nouchi, A., Kugimiya, W., Haque, Z. and Saio, K. (1981). Physical and chemical characteristics of extruded rice flour and rice flour fortified with soybean protein isolate. **J. of Food Sci.** 47: 240-245.
- Phillips, R.D. and Finley, J.W. 1989. **Protein quality and the effects of processing**. Marcel Dekker: New York, USA.
- Prudencio-Ferreira, S.H. and Areas, J.A.G. 1993. Protein-protein interaction in the extrusion of soya at various temperature and moisture contents. **J. of Food Sci.** 58: 378-381.

- Rhee, K.C., Kuo, C.K. and Lusas, E.W. (1981). Texturization. In J.P. Cherry (ed.), **Protein functionality in food**. American Chemistry Society: Washington DC., USA.
- Salunkhe, D. K. and Kadam, S.S. (1989). CRC Handbook of world food legumes: **Nutritional chemistry, processing technology and utilization. Vol. III**. CRC Press: Florida, USA.
- Sheard, P.R., Ledward, D.A. and Mitchell, J.R. (1984). Role of carbohydrates in soya extrusion. **J. Food Tech.** 19: 475-483.
- Tolstoguzov, V.B., Grinberg, V.Y. and Gurov, A. N. (1985). Some physicochemical approaches to the problem of protein texturization. **J. of Agric. Food Chem.** 32(2): 151-159.
- Tolstoguzov, V. B. (1993). Thermoplastic extrusion-the mechanism of the formation of extrudate structure and properties. **JAOCs.** 70(4): 417-424.
- Yuryev, V.P., Zasytkin, D.V., Alexeyev, V.V. and Bogatyryev, A.N. (1995). Expansion ratio of extrudates prepared from potato starch-soybean protein mixtures. **Carb. Polym.** 26: 215-218.

บทที่ 4

ผลของโพแทสเซียมโบรเมต และแป้งสาลี ต่อลักษณะของเนื้อเทียม โปรตีนถั่วเหลือง

EFFECTS OF POTASSIUM BROMATE AND WHEAT FLOUR ON CHARACTERISTICS OF SOY PROTEIN MEAT ANALOG

4.1 บทคัดย่อ

การเติมโพแทสเซียมโบรเมตที่ระดับ 0-180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในการทำเอกซ์ทรูชันของส่วนผสมระหว่างแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน 80 เปอร์เซ็นต์ และโปรตีนถั่วเหลืองสกัด 20 เปอร์เซ็นต์ ด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ ทำให้เนื้อเทียมมีระดับของพันธะไดซัลไฟด์ และปริมาณหมู่ซัลไฮดริลไม่แตกต่างจากเนื้อเทียมที่ไม่ได้เติมโพแทสเซียมโบรเมต ($p>0.05$) และทำให้เนื้อเทียมมีความเครียดไม่แตกต่างจากเนื้อเทียมที่ไม่ได้เติมโพแทสเซียมโบรเมต เมื่อวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ($p>0.05$) จากการตรวจสอบลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสด้วยวิธี Quantitative Descriptive Analysis พบว่าเนื้อเทียมที่เติมโพแทสเซียมโบรเมต 0-180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีลักษณะทางด้านการฉีกได้และความเป็นเส้นใยไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) รวมทั้งอัตราการขยายตัวของเนื้อเทียมด้วย

การเติมแป้งสาลีเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 40 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เนื้อเทียมมีอัตราการขยายตัว และลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางด้านการฉีกได้และความเป็นเส้นใยมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อเทียมที่ไม่ได้เติมแป้งสาลี ($p<0.05$) เนื้อเทียมที่เติมแป้งสาลี 20 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความเครียดสูงสุด ($p<0.05$) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งสาลีเป็น 40 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เนื้อเทียมมีความเครียดลดลง โดยที่แรงทอร์คและความดันที่หัวแบบของเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้งสาลีในระดับที่แตกต่างกัน 0-40 เปอร์เซ็นต์ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) ส่วนเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของสตาร์ชสาลี เนื้อเทียมที่เติมแป้งสาลี และเนื้อเทียมที่เติมส่วนผสมของกลูเตนและสตาร์ชสาลี มีอัตราการขยายตัว และลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางด้านการฉีกได้และความเป็นเส้นใยมากกว่าเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของกลูเตน และเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง ($p<0.05$) ในขณะที่เนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของกลูเตน และเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง มีความเครียดไม่แตกต่างทางสถิติกับเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของสตาร์ชสาลี และเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของกลูเตนและสตาร์ชสาลี ($p>0.05$)

4.2 บทนำ

การแปรรูปเนื้อเทียมด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเอกซ์ทรูชันมีเนื้อสัมผัสคล้ายเนื้อสัตว์มาก และมีต้นทุนในการผลิตต่ำ เนื้อเทียมส่วนใหญ่ใช้โปรตีนถั่วเหลืองเป็นวัตถุดิบหลัก เนื่องจากมีราคาถูกและมีสารอาหารที่เป็นประโยชน์สูงโดยเฉพาะโปรตีน แต่ทั้งนี้โปรตีนของถั่วเหลืองมีข้อจำกัดทางด้านมีกรดอะมิโนที่มีซัลเฟอร์ ได้แก่ ซิสเตอีน และเมทไธโอนีนต่ำ ดังนั้นการรับประทานผลิตภัณฑ์อาหารจากถั่วเหลืองจึงอาจต้องรับประทานร่วมกับอาหารจากพืชชนิดอื่นๆ เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพทางสารอาหาร ประเภทโปรตีนที่รับประทานให้ดีขึ้น โปรตีนถั่วเหลืองที่สำคัญ ได้แก่ ไกลซีนิน (glycinin) และเบต้า-คอนไกลซีนิน (β -conglycinin) ซึ่งไกลซีนินเป็นโปรตีน 11S โกลบูลิน (11S globulin) ซึ่งมีบทบาทสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนในผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก (Liu, 1997) โมเลกุลส่วนย่อยของไกลซีนินเชื่อมกันด้วยพันธะไดซัลไฟด์ 3 พันธะ ส่วนเบต้า-คอนไกลซีนินเป็นโปรตีน 7S โกลบูลิน (7S globulin) ไม่มีการเชื่อมโยงโมเลกุลย่อยด้วยพันธะไดซัลไฟด์ (Liu, 1997) การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรตีนที่ส่งผลกระทบต่อพันธะทางเคมีของโมเลกุลโปรตีน พันธะไดซัลไฟด์จัดเป็นพันธะที่เชื่อมโยงโครงสร้างตามธรรมชาติของโปรตีนส่วนใหญ่ ที่ทำให้การจัดเรียงตัวของโครงสร้างมีความเสถียร (Phillip, 1989; Liu, 1997; Rasu, Clark, Hasse-Pettingel, King, and Thomas, 2001) ซึ่งมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีน และส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดโครงสร้างที่แข็งแรงของเจล (gel) และโด (dough) ในผลิตภัณฑ์อาหาร (Shimada and Cheftel, 1989; Ledward and Tester, 1994; Firedman, 1994) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของพันธะไดซัลไฟด์ด้วยการแลกเปลี่ยน โมเลกุลระหว่างพันธะไดซัลไฟด์และกลุ่มซัลไฮดริลของกรดอะมิโนในโมเลกุลของโปรตีน (interchange) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) และรีดักชัน (reduction) จึงมีอิทธิพลต่อโครงสร้างของโปรตีนในอาหาร โดยที่ปฏิกิริยาเหล่านี้พบได้ในกระบวนการผลิตอาหาร เช่น การให้ความร้อน แรงเฉือน การเติมสารออกซิไดซิ่ง และสารรีดิวซิ่ง เป็นต้น (Areas, 1992; Guingamp and Hambert, 1999)

การแปรรูปเนื้อเทียมด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันได้รับการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง (Atkinson, 1970; Harper, 1981; Kearns, Rokey, and Huber, 1989) เพื่อปรับปรุงให้ผลิตภัณฑ์เป็นที่ยอมรับจากผู้บริโภคมากยิ่งขึ้น โดยมีการพัฒนาปรับปรุงทั้งทางด้านกระบวนการแปรรูป (Sair and Quass, 1976; Wenger, Osterhaus, and Smith, 1976) และการใช้สารเติมแต่งประเภทโปรตีนและคาร์โบไฮเดรต รวมทั้งสารเคมีต่างๆ อาทิเช่น โซเดียมคลอไรด์ กรดแอสคอร์บิก โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และซิสเตอีน เป็นต้น (Kearns et al., 1989; Boison, Taranto,

and Cheryan, 1983; Li and Lee, 1996b, 1998; Cegla, Taranto, Bell, and Rhee, 1978) ในการแปรรูปเนื้อเทียมด้วยกระบวนการหุงต้มแบบเอกซ์ทรูชันนั้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของโปรตีนในวัตถุดิบ จากการรายงานการวิจัยเบื้องต้นพบว่าพันธะไดซัลไฟด์มีความสำคัญต่อการสร้างเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (Harper, 1981; Sheard, Ledward, and Mitchell, 1984) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Rhee, Kuo และ Lusas (1981) พบว่าพันธะนอนโควาเลนต์และอินเตอร์เซนเจอร์ระหว่างหมู่ซัลไฮดริลและพันธะไดซัลไฟด์เป็นปฏิกิริยาทางเคมีหลักที่เกิดขึ้นระหว่างการเอกซ์ทรูชันของโปรตีนถั่วเหลือง ส่วน Burgess และ Stanley (1976) รายงานว่าหลังกระบวนการเอกซ์ทรูชันของโปรตีนถั่วเหลืองทำให้มีกลุ่มซัลไฮดริลอิสระเพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้มียุทธศาสตร์ที่ยืนยันว่าพันธะไดซัลไฟด์แตกแยกระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน และเกิดขึ้นใหม่เพื่อสนับสนุนโครงสร้างสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ให้มีความเสถียร (Hager, 1984; Ledward and Tester, 1994) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของพันธะไดซัลไฟด์ต่อโครงสร้างภายในของเอกซ์ทรูเดโปรตีนถั่วเหลือง

การเปลี่ยนแปลงการเชื่อมโยงทางเคมีในโครงสร้างของผลิตภัณฑ์อาหาร ด้วยการเติมสารเติมแต่งทางเคมีลงในวัตถุดิบก่อนนำไปแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหาร จึงได้รับการศึกษาวิจัยเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะการปรับปรุงคุณภาพของแป้งเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ขนมอบ สารเคมีที่นำมาใช้ได้แก่ ซัลไฟต์ (sulfite) ซิสเตอีน (cysteine) กรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid) และโพแทสเซียมโบรเมต (potassium bromate) เป็นต้น (Marino, Rothamel, and Rieken, 1983; Ballard, DeMarco, Lamkey, and Jevne, 2003) ในปี ค.ศ. 1915 Kohman, Hoffman และ Godfrey ได้นำโพแทสเซียมโบรเมตซึ่งเป็นสารออกซิไดซิง มาใช้ปรับปรุงคุณภาพของขนมปังจากแป้งสาลี ช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของหมู่ซัลไฮดริลของกรดอะมิโนในกลูเตนสาลีเกิดพันธะไดซัลไฟด์ใหม่ขึ้นได้ และทำให้ขนมปังมีปริมาตรเพิ่มขึ้น โดย Panuzzo, Bekes, Wrigley และ Gupta (1994) รายงานว่าการเติมโพแทสเซียมโบรเมตประมาณ 5-10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของแป้ง ทำให้ก้อนขนมปังมีปริมาตรมากที่สุด แต่ถ้าเพิ่มปริมาณมากกว่า 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะทำให้โคเหนียวและแตกแยกออกจากกัน เนื่องจากเกิดสารประกอบระหว่างไขมันกับโปรตีนด้วยพันธะนอนโควาเลนต์ ทำให้ขนมปังที่มีโบรเมตสูงมีคุณภาพในการอบลดลงมาก นอกจากนี้เมื่อศึกษาผลของสารรีดิวซิงที่เติมในแป้งถั่วเหลืองพร้อมไขมันก่อนนำไปสร้างเนื้อสัมผัสของ Rhee และคณะ (1981) พบว่าการเติมซิสเตอีน ประมาณ 0.1-0.5 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ความหนาแน่นจำเพาะของเอกซ์ทรูเดจากโปรตีนถั่วเหลืองลดลง และมีความสามารถในการกักเก็บน้ำเพิ่มขึ้น แต่จากการศึกษาของ Li และ Lee (1996b, 1998) รายงานว่าการเติมซิสเตอีน 0.25-1.5 เปอร์เซ็นต์ ในแป้งสาลีก่อนการทำเอกซ์ทรูชัน พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีอัตราการขยายตัว และความ

สามารถในการดูดซับน้ำลดลง อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานการใช้โพแทสเซียมโบรเมทเป็นสารออกซิไดซ์ซึ่งในกระบวนการเอกซ์ทรูชันของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง ทั้งนี้การเติมโพแทสเซียมโบรเมทในวัตถุดิบเพื่อใช้ในการแปรรูปเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง อาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธะเคมีของโครงสร้างโปรตีน ซึ่งอาจทำให้เนื้อเทียมมีเนื้อสัมผัสที่แข็งแรงขึ้น

ส่วนการเติมโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่นๆ ร่วมกับโปรตีนถั่วเหลืองเพื่อเป็นวัตถุดิบในการแปรรูปเนื้อเทียมด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของเนื้อเทียมเช่นกัน วิญญูดา จันทพรชัย, เพ็ญขวัญ ชมปริดา และวิชัย หฤทัยธนา คันทดี (2537) พบว่าปริมาณของกลูเตนสาลี (wheat gluten) ที่เหมาะสมที่สามารถเติมในแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมันเพื่อผลิตเนื้อเทียมในระดับ 40 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ได้เนื้อเทียมที่มีความแข็งแรงและมีคุณภาพดีขึ้น Payne และ Egbert (1997) ผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัดกับโปรตีนกลูเตนสาลีหรือคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนอื่นๆ เช่น แซนแทน กัม, โลกัส บีน กัม และสตาร์ช เพื่อผลิตเนื้อเทียมชนิดที่นำไปทดแทนเนื้อสัตว์ได้บางส่วน ส่วน Lin, Huff และ Hsieh (2000, 2002) ได้แปรรูปเนื้อเทียมโดยเติมสตาร์ชสาลี (wheat starch) 10 เปอร์เซ็นต์ในโปรตีนถั่วเหลืองสกัด ทำเอกซ์ทรูชันด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ที่ความชื้นสูงมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อแน่นไม่พองตัวและมีลักษณะเส้นใยคล้ายเนื้อสัตว์มาก อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานการนำแป้งสาลี (wheat flour) มาเป็นส่วนผสมในวัตถุดิบสำหรับการผลิตเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง ทั้งนี้การเติมแป้งสาลีในวัตถุดิบสำหรับการแปรรูปเนื้อเทียมนั้น นอกจากมีส่วนทำให้ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมมีคุณค่าทางสารอาหารประเภทโปรตีนดีขึ้น เนื่องจากมีกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกายครบถ้วนแล้ว อาจทำให้เนื้อเทียมมีเนื้อสัมผัสและสมบัติเชิงหน้าที่ดีขึ้น ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งศึกษาผลของโพแทสเซียมโบรเมท ต่อลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง และศึกษาระดับแป้งสาลีที่เติมในวัตถุดิบผสมของแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมันและโปรตีนถั่วเหลืองสกัดในปริมาณที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่มีคุณลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงหน้าที่ที่ดีขึ้น รวมทั้งศึกษาบทบาทของโปรตีนกลูเตนสาลีและสตาร์ชสาลี ที่มีต่อลักษณะทางกายภาพของเนื้อเทียมโปรตีนถั่วเหลือง

4.3 วัตถุประสงค์และวิธีการ

4.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

4.3.1.1 การเตรียมวัตถุดิบเพื่อศึกษาผลของโพแทสเซียมโบรเมท (potassium bromate) ($KBrO_3$) นำแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน (Defatted soy flour: DSF) และโปรตีนถั่ว

เหลืองสกัด (soy protein isolate: SPI) (Profam 970) จากบริษัท ADM Protein Specialties (Decatur, IL, USA.) มาผสมกันในอัตราส่วน SPI 20 เปอร์เซ็นต์ (w/w) ซึ่งใช้เป็นสูตรควบคุมแล้วจึงนำวัตถุดิบที่ผ่านการผสมนั้นมาเติมโพแทสเซียมโบรเมท 60, 120, และ 180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แล้วจึงผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วนำไปแปรรูปทันที

4.3.1.2 การเตรียมวัตถุดิบเพื่อศึกษาระดับของแป้งสาลี (wheat flour) นำ DSF และ SPI (Profam 970) จากบริษัท ADM Protein Specialties (Decatur, IL, USA.) และแป้งสาลีตราหงส์ขาวจากบริษัทยูไนเต็ดฟลาวมิลล์ จำกัด (มหาชน) มาผสมกันในอัตราส่วนแป้งสาลี 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์ (w/w) ดังตารางที่ 4.1 เก็บวัตถุดิบที่ผสมแล้วในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในระหว่างรอการผลิต

4.3.1.3 การเตรียมวัตถุดิบเพื่อการศึกษาผลของสตาร์ชสาลี (wheat starch) กลูเตนสาลี (wheat gluten) และแป้งสาลี (wheat flour) นำ DSF, SPI (Profam 970) จากบริษัท ADM Protein Specialties (Decatur, IL, USA.) และแป้งสาลี หรือสตาร์ชสาลี หรือ กลูเตนสาลี หรือ สตาร์ชสาลีและกลูเตนสาลีมาผสมกัน ในอัตราส่วนดังตารางที่ 4.2 เก็บวัตถุดิบที่ผสมแล้วในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในระหว่างรอการผลิต

4.3.2 การแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

นำวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิดได้แก่ วัตถุดิบที่เติมโพแทสเซียมโบรเมท 4 สูตร วัตถุดิบที่เติมแป้งสาลี 3 สูตร และวัตถุดิบที่ไม่ได้เติมและเติมส่วนผสมของ สตาร์ชสาลี, กลูเตนสาลี, แป้งสาลี และส่วนผสมของ สตาร์ชสาลี และกลูเตนสาลี รวม 5 สูตร มาป้อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ โดยมีรูปแบบการจัดเรียงสกรู และสภาวะการแปรรูปตามการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.3 ในบทที่ 3 ผลิตรกณ์เนื้อเทียมที่ได้นำไปอบแห้งในตู้อบร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จนกระทั่งผลิตรกณ์มีความชื้นไม่เกิน 9 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และนำไปเก็บไว้ในห้องเย็นก่อนที่จะนำไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและทางเคมี

4.3.3 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design: CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลด้วยการวิเคราะห์หว่าเรียนซ์ (Analysis of variance: ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรม Statistical Analysis System (SAS) version 9.0

ตารางที่ 4.1 ปริมาณส่วนผสม และ โปรตีนทั้งหมดในวัตถุดิบ สำหรับการแปรรูปเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้งสาลี ในระดับ 0-40 เปอร์เซ็นต์

Formula	SPI ⁽¹⁾ (%)	DSF ⁽²⁾ (%)	WF ⁽³⁾ (%)	Total protein content (%)
1	20	80	0	58.0
2	30	50	20	54.8
3	30	30	40	47.6

(1)โปรตีนถั่วเหลืองสกัด

(2)แป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน

(3)แป้งสาลี

ตารางที่ 4.2 ปริมาณส่วนผสม และ โปรตีนทั้งหมดในวัตถุดิบสำหรับแปรรูปของเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของกลูเตนสาลี สตาร์ชสาลี และแป้งสาลี

Formula	DSF (%)	SPI (%)	WG ⁽¹⁾ (%)	WS ⁽²⁾ (%)	WF (%)	Total protein content (%)
1	80	20	-	-	-	58.0
2	80	10	10	-	-	59.0
3	44	40	-	16	-	58.0
4	40	40	-	-	20	58.8
5	40	40	2.8	17.2	-	58.8

(1)โปรตีนกลูเตนสาลี

(2)สตาร์ชสาลี

4.3.4 การตรวจสอบลักษณะของผลิตภัณฑ์

4.3.4.1 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ

1) การตรวจสอบเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมทั้งสามชนิด ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ตามวิธีการในบทที่ 3

2) การทดสอบลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมทั้งสามชนิดทางด้านลักษณะทางการฉีกได้ และความเป็นเส้นใย ตามวิธีการในบทที่ 3

3) การวัดอัตราการขยายตัวของเนื้อเยื่อทั้งสามชนิด ตามวิธีการในบทที่ 3

4) การวัดดัชนีความสมบูรณ์ของโครงสร้าง(structure integrity index) (Harper, 1981) ของเนื้อเยื่อ โดยนำตัวอย่างบดด้วยโถปั่นผสม (blender) เป็นระยะเวลา 1 นาที แล้วมาร้อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 20 mesh นำส่วนที่ค้างอยู่บนตะแกรง มาแช่ในน้ำเป็นระยะเวลา 5 นาที ปล่อยให้สะเด็ดน้ำ แล้วนำไปให้ความร้อนในภาชนะปิด ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส 15 นาที (autoclave) แล้วจึงนำภาชนะที่บรรจุตัวอย่างมาแช่น้ำเพื่อลดอุณหภูมิลงจนตัวอย่างมีอุณหภูมิห้องและนำตัวอย่างออกมามบดด้วยโถปั่นผสม นำส่วนที่ผ่านการบด 100 กรัม มาวางบนตะแกรงขนาด 20 mesh นิดล้างด้วยน้ำเย็น 1 นาที เขย่าให้น้ำส่วนที่เกินไหลออกไปพร้อมทั้งซับน้ำด้วยผ้าให้แห้ง ซึ่งน้ำหนักของตัวอย่างส่วนที่ค้างอยู่บนตะแกรง คำนวณตามสมการต่อไปนี้

$$\text{ดัชนีความสมบูรณ์} = \frac{\text{น้ำหนักของส่วนที่ค้างอยู่บนตะแกรง}}{\text{น้ำหนักของตัวอย่างที่ผ่านการบด}}$$

4.3.4.2 การตรวจสอบสมบัติทางเคมี

1) การตรวจสอบความสามารถในการละลายของโปรตีน (protein solubility) และความเข้มข้นของโปรตีนของเนื้อเยื่อที่ศึกษาผลของโพแทสเซียมโบรเมทตามวิธีการในบทที่ 3 โดยมีบัฟเฟอร์ที่ใช้ในการสกัด 4 ชนิด ได้แก่ (1) สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.035 โมลาร์ pH 7.6 (P) (2) สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีเมอแคปโทเอทานอล (2-mercaptoethanol) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ pH 7.6 (P+ME) (3) สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มียูเรียความเข้มข้น 8 โมลาร์ และโซเดียมโคเดซิลซัลเฟต ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์ pH 7.6 (P+U+S) (4) สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีโซเดียมโคเดซิลซัลเฟต ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์ ยูเรีย ความเข้มข้น 8 โมลาร์ และเมอแคปโทเอทานอล ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ pH 7.6 (P+S+U+M)

2) การตรวจสอบปริมาณหมู่ซัลไฮดริลอิสระ (free sulfhydryl group) ของเนื้อเยื่อที่ศึกษาผลของโพแทสเซียมโบรเมท (Li and Lee, 1996a; Adachi, Chunying and Utsumi, 2004) ผสมสารละลายตัวอย่างที่มีโปรตีนความเข้มข้น 4 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งสกัดด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มียูเรียความเข้มข้น 8 โมลาร์ และโซเดียมโคเดซิลซัลเฟต ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์ pH 7.6 ปริมาณ 1 มิลลิลิตร กับสารละลายเอลแมน (Ellman's reagent: DTNB) ซึ่งทำละลายในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล ที่ความ

เข้มข้น 4 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ที่ pH 7.6 ปริมาณ 100 ไมโครลิตร นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 412 นาโนเมตรคำนวณปริมาณหมู่ซัลไฮดริล โดยใช้ค่าโมลาร์แอบซอร์บติวิตี (molar absorptivity: ϵ) $13600 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ คำนวณปริมาณซัลไฮดริลในหน่วย ไมโคร โมล ต่อ กรัมโปรตีน

4.4 ผลการทดลองและการวิจารณ์

4.4.1 ผลของโพแทสเซียมโบรเมท

4.4.1.1 ผลของโพแทสเซียมโบรเมทต่อพันธะเคมี

จากการศึกษาปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ที่แสดงถึงชนิดพันธะเคมีในเนื้อเทียมที่เติม PB บ่งชี้ว่าพันธะไดซัลไฟด์ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจนมีบทบาทสำคัญต่อการเชื่อมโยงโครงสร้างโปรตีนของเนื้อเทียม ซึ่งเห็นได้จากปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ของเนื้อเทียมที่เติมโพแทสเซียมโบรเมทในระดับ 0-180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ใน P+ME มีค่าไม่แตกต่างจากของ P+S+U ($p > 0.05$) ดังตารางที่ 4.3 นอกจากนี้ยังพบว่าพันธะเคมีสำคัญที่เชื่อมโยงภายในโมเลกุลโปรตีนของวัตถุดิบ ได้แก่ พันธะไดซัลไฟด์ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเป็นพันธะเคมีชนิดเดียวกันกับที่พบในโครงสร้างโปรตีนของเนื้อเทียม ซึ่งสังเกตได้จากปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ของวัตถุดิบที่เติมโพแทสเซียมโบรเมท 0-180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ใน P+ME มีค่าไม่แตกต่างจากของ P+S+U ($p > 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.3

เมื่อศึกษาผลของโพแทสเซียมโบรเมทในระดับ 60, 120 และ 180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ต่อการสร้างพันธะเคมีของโปรตีนในเนื้อเทียม แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าเนื้อเทียมที่มีโพแทสเซียมโบรเมทมีการเชื่อมโยงโครงสร้างทางเคมีด้วยพันธะไดซัลไฟด์ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเป็นพันธะเคมีชนิดเดียวกันกับที่พบในเนื้อเทียมที่ไม่ได้เติมโพแทสเซียมโบรเมท โดยพิจารณาจากปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ใน P+ME ของเอกซ์ทรูเดตที่เติมโพแทสเซียมโบรเมท 60, 120, 180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าไม่แตกต่างทางสถิติกับของเอกซ์ทรูเดตที่ไม่มีส่วนผสมของโพแทสเซียมโบรเมท ($p > 0.05$) รวมทั้งปริมาณหมู่ซัลไฮดริลของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่ไม่มีและมีส่วนผสมของโพแทสเซียมโบรเมท 60, 120 และ 180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 การวัดปริมาณโปรตีนที่ละลายได้นี้อาจนำมาใช้อ้างอิงถึงระดับการเชื่อมโยงทางพันธะเคมีในโครงสร้างของโปรตีนได้ แสดงว่าการเติมโพแทสเซียมโบรเมทอาจไม่มีผลต่อระดับพันธะไดซัลไฟด์ระหว่างโมเลกุลโปรตีนของเนื้อเทียม จึงไม่มีผลต่อปริมาณหมู่ซัลไฮดริลในเนื้อเทียมด้วย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่สภาวะการเอกซ์ทรูชันไม่เหมาะสมต่อการทำงานของโพแทสเซียมโบรเมท เนื่องจาก

โพแทสเซียมโบรเมททำปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างหมู่ซัลไฟด์ริลของโปรตีน ให้เกิดเป็นพันธะไดซัลไฟด์อย่างช้าๆ ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง ซึ่งพบได้ในการทำงานมปัง ส่วนกระบวนการเอกซ์ทรูชันเป็นกระบวนการให้ความร้อน และความดันสูงในระยะเวลาสั้น จึงทำให้โพแทสเซียมโบรเมทไม่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดพันธะไดซัลไฟด์ในโครงสร้างของโปรตีนถั่วเหลืองได้ จึงไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการเชื่อมโยงของพันธะไดซัลไฟด์ในโปรตีนถั่วเหลืองของเนื้อเทียม นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณหมู่ซัลไฟด์ริลของโปรตีนถั่วเหลืองในเนื้อเทียม มีค่าไม่แตกต่างทางสถิติกับของวัตถุดิบที่มีปริมาณโพแทสเซียมโบรเมทเท่ากัน ($p > 0.05$) (ตารางที่ 4.4) แสดงว่าการเอกซ์ทรูชันไม่ได้ทำให้ปริมาณหมู่ซัลไฟด์ริลของโปรตีนถั่วเหลืองเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งขัดแย้งกับผลการทดลองของ Burgess และ Stanley (1976) ที่รายงานว่าหลังจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันของโปรตีนถั่วเหลืองทำให้มีกลุ่มซัลไฟด์ริลอิสระเพิ่มขึ้น และจากผลการทดลองของ Rebello และ Schaich (1990) พบว่าการเอกซ์ทรูชันของแป้งสาลีที่ความชื้น 20 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 160 และ 185 องศาเซลเซียส ทำให้ปริมาณหมู่ซัลไฟด์ริลในโมเลกุลโปรตีนลดลง รวมทั้งจากผลการวิจัยของ Li และ Lee (2000) ที่รายงานว่าการทำเอกซ์ทรูชันของแป้งถั่วเลนทิว (lentil bean flour) มีปริมาณพันธะไดซัลไฟด์และหมู่ซัลไฟด์ริลของโปรตีนถั่วเลนทิวในเอกซ์ทรูเตลดลดลง นอกจากนี้โปรตีนถั่วเหลืองมีกรดอะมิโนซิสเตอีนในปริมาณจำกัด โดยโปรตีนถั่วเหลืองมีซิสเตอีน 2.5 มิลลิกรัมต่อกรัมโปรตีน จึงอาจทำให้การเกิดพันธะไดซัลไฟด์เพิ่มขึ้นในปริมาณน้อยในโครงสร้างของโปรตีนของเอกซ์ทรูเตด จึงอาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการเชื่อมโยงของพันธะไดซัลไฟด์ในโปรตีนถั่วเหลืองไม่ชัดเจนเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของพันธะไดซัลไฟด์ในโครงสร้างของโปรตีนสาลีที่มีซิสเตอีนสูงถึง 23 มิลลิกรัมต่อกรัมโปรตีน (Liu, 1997) ดังจะเห็นได้อย่างชัดเจนในผลการทดลองของ Li และ Lee (1996b, 1998) ที่พบว่าเมื่อเติมซิสเตอีนที่เป็นสารรีดิวซิ่งในช่วง 0.25-1.5 เปอร์เซ็นต์ ในการเอกซ์ทรูชันของแป้งสาลี ทำให้ปริมาณพันธะไดซัลไฟด์เพิ่มขึ้นเกือบสองเท่าที่ระดับความเข้มข้นซิสเตอีน 1.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของปริมาณซัลไฟด์ริลในโปรตีนสาลีของเอกซ์ทรูเตด

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.3 ยังพบว่าปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ใน P+S+U ของเอกซ์ทรูเตดที่เติมโพแทสเซียมโบรเมท 60, 120, 180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าไม่แตกต่างทางสถิติกับของเอกซ์ทรูเตดที่ไม่มีส่วนผสมของโพแทสเซียมโบรเมท ($p > 0.05$) แสดงว่าการเติมโพแทสเซียมโบรเมทอาจไม่มีผลต่อระดับอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจนเช่นกัน รวมทั้งการเติมโพแทสเซียมโบรเมท ในวัตถุดิบก็ไม่ได้ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของพันธะเคมีทุกชนิดภายในโมเลกุลโปรตีน โดยสังเกตได้จากปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ของวัตถุดิบที่ไม่มี

และมีส่วนผสมของโพแทสเซียมโบรเมท ที่ระดับ 60, 120, 180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ใน P+ME มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) ซึ่งพบผลเช่นเดียวกันนี้ใน P+S+U ($p>0.05$)

ตารางที่ 4.3 ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ (กรัม/กรัม โปรตีน) ของวัตถุดิบ (M) และเนื้อเทียม (P) ที่เติมโพแทสเซียมโบรเมท 0-180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในตัวทำละลาย 3 ชนิด

PB content/ Buffer	P ⁽¹⁾	P+M ⁽²⁾	P+S+U ⁽³⁾
0 (mg/kg) (M)	0.527 B ⁽⁴⁾	0.886A	1.008a ⁽⁵⁾ , A
60 (mg/kg) (M)	0.472 B	0.832A	0.796b, A
120 (mg/kg) (M)	0.431 B	0.709A	0.763b, A
180 (mg/kg) (M)	0.433 B	0.774A	0.794b, A
0 (mg/kg) (P)	0.082	0.171	0.225
60 (mg/kg) (P)	0.119	0.235	0.297
120 (mg/kg) (P)	0.104	0.193	0.230
180 (mg/kg) (P)	0.084	0.171	0.238

⁽¹⁾ หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

⁽²⁾ หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีเมอแคปโทเอธานอล

⁽³⁾ หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มียูเรีย และ โซเดียม โดเดซิลซัลเฟต

⁽⁴⁾ ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

⁽⁵⁾ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

จากการเปรียบเทียบปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ของเนื้อเทียมกับวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการแปรรูปด้วยการเอกซ்தรชัน ดังตารางที่ 4.3 พบว่าปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ของเอกซ்தรเตดทุกสูตรในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ทั้งสามชนิด มีค่าต่ำกว่าปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ของวัตถุดิบอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) แสดงว่ากระบวนการเอกซ்தรชันทำให้ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองมีค่าลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากการที่โปรตีนถั่วเหลืองที่ผ่านการเอกซ்தรชันมีการจัดเรียงโครงสร้างในรูปแบบใหม่ที่มีความซับซ้อนมากขึ้นด้วยพันธะไดซัลไฟด์ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเป็นพันธะเคมีชนิดเดียวกับที่พบภายในโมเลกุลโปรตีนของวัตถุดิบ จึงทำให้ความสามารถในการสกัดโปรตีนของสารตัวทำละลายลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองจากบทที่ 3 ในหัวข้อที่ 3.4.2

ตารางที่ 4.4 ปริมาณหมู่ซัลไฮดริล (ไมโคร โมล/กรัม โปรตีน) ของวัตถุดิบ (M) และเนื้อเทียม (P) ที่เติมโพแทสเซียมโบรเมท (PB) 0-180 มิลลิกรัมต่อ กิโลกรัม

Type/ PB content (mg/kg)	Sulfhydryl group content (μ mole/ g protein)			
	0	60	120	180
M	7.88	8.86	7.69	8.47
P	8.89	9.05	9.39	8.71

4.4.1.2 ผลของโพแทสเซียมโบรเมทต่อลักษณะทางกายภาพ

จากการศึกษาผลของโพแทสเซียมโบรเมทต่อการสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียม ดังตารางที่ 4.5 พบว่าโพแทสเซียมโบรเมทที่ระดับ 60-180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่มีส่วนช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้เนื้อเทียม โดยเนื้อเทียมที่เติมโพแทสเซียมโบรเมทในระดับ 60, 120 และ 180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีความเครียดไม่แตกต่างทางสถิติกับเนื้อเทียมที่ไม่มีส่วนผสมของโพแทสเซียมโบรเมท ($p>0.05$) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่โพแทสเซียมโบรเมทไม่มีผลต่อการเพิ่มพันธะไดซัลไฟด์ในโครงสร้างโปรตีนของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง ดังเห็นได้จากผลการทดลองด้านพันธะเคมีในหัวข้อที่ผ่านมาข้างต้น และอาจเป็นผลมาจากการที่อัตราการขยายตัวของเนื้อเทียมที่มีโพแทสเซียมโบรเมทในระดับ 0-180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) (ตารางที่ 4.5) นอกจากนี้ยังพบว่าโพแทสเซียมโบรเมทไม่ได้มีส่วนช่วยปรับปรุงการจัดเรียงตัวแบบเส้นใยของเนื้อเทียม โดยพบว่าเนื้อเทียมที่เติมโพแทสเซียมโบรเมท 0, 60, 120 และ 180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางการฉีกได้ และความเป็นเส้นใยไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) รวมทั้งการเติม โพแทสเซียมโบรเมทที่ระดับ 60-180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่มีผลต่อสมบัติทางด้านกรไหลของโคเนื้อเทียม ซึ่งสังเกตได้จากการที่ทอร์คและความดันที่หัวแบบของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่เติมโพแทสเซียมโบรเมท ที่ระดับ 0-180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) แสดงให้เห็นว่าโพแทสเซียมโบรเมทไม่มีผลต่อการสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียม เนื่องจากเนื้อเทียมที่มีและไม่มีโพแทสเซียมโบรเมทเป็นส่วนผสมมีความแข็งแรงของเนื้อสัมผัส และลักษณะการจัดเรียงตัวแบบเส้นใยของโครงสร้างภายในที่ไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.5 ตัวแปรของกระบวนการเอกซ์ทรูชันและลักษณะทางกายภาพของเนื้อเทียมโปรตีนถั่วเหลืองที่เติมโพแทสเซียมโบรเมต 0-180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

Extrusion parameters and Characteristics	Potassium bromate (mg/kg)			
	0	60	120	180
Torque (%)	35.83	39.17	38.83	40.83
Die pressure (psi)	228.33	250.00	243.33	256.67
Expansion ratio	2.13	2.02	2.07	1.98
Stress (g/cm ²)	2,599	3,238	3,175	3,212
Textural appearance score				
- Tearing	5.85	5.59	5.59	6.60
- Fibrousness	5.56	5.29	5.67	6.48

ผลการทดลองข้างต้นนี้ไม่สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Rhee และคณะ (1981) ที่พบว่าการเติมสารออกซิไดซิ่งในวัตถุดิบเพื่อแปรรูปเนื้อเทียม ทำให้เนื้อเทียมไม่พองตัว และมีเนื้อสัมผัสที่ไม่ดี โดย Rhee และคณะ ได้เติมสารออกซิไดซิ่ง ได้แก่ โพแทสเซียมไอโอเดต 0.01 และ 0.05 เปอร์เซ็นต์ ในแป้งถั่วเหลืองพองไขมัน แล้วนำไปแปรรูปด้วยเครื่องสร้างเนื้อสัมผัสด้วยการกดอัด (hand press texturizer) ที่ความชื้น 25 เปอร์เซ็นต์ ได้เนื้อเทียมมีรูปร่างแบบแท่งที่ไม่พองตัว ผิวหน้าหยาบและไม่ต่อเนื่อง มีความเครียดและโครงสร้างแบบเส้นใยน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม ซึ่งอาจเป็นผลจากความแตกต่างทางด้านหลักการแปรรูป กล่าวคือการสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมด้วยเครื่องสร้างเนื้อสัมผัสแบบการกดอัดไม่มีขั้นตอนของการถนอม จึงทำให้โมเลกุลของโปรตีนไม่ได้คลายตัวออกเป็นโครงสร้างสายยาวอย่างสมบูรณ์ และเมื่อเติมโพแทสเซียมไอโอเดตลงในวัตถุดิบ จึงทำให้เกิดการเกาะตัวกันของโมเลกุลโปรตีนอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งทำให้ไม่เกิดการจัดเรียงตัวแบบเส้นใยของโครงสร้างภายในเนื้อเทียม และอาจทำให้เนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมไม่แข็งแรง แต่เมื่อเติมโซเดียมซัลไฟด์ และซิสเตอีน ซึ่งเป็นสารรีดิวซิ่งที่ระดับ 0.1-0.5 เปอร์เซ็นต์ ในแป้งถั่วเหลืองพองไขมันแล้วแปรรูปด้วยการกดอัดเช่นเดิม พบว่าผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมมีการขยายตัวเพิ่มขึ้น มีความหนาแน่นจำเพาะลดลง และมีความสามารถในการกักเก็บน้ำมากกว่าตัวอย่างควบคุม เนื่องจากพันธะไดซัลไฟด์ในโครงสร้างของโปรตีนตามธรรมชาติ ถูกทำลายด้วยสารรีดิวซิ่ง ส่งผลให้โมเลกุลโปรตีนเกิดการคลายตัวออกเป็นโครงสร้างแบบสายยาว จึงสามารถเรียงตัวเป็นโครงสร้างร่างแหที่ต่อเนื่องซึ่งจัดเป็นโครงสร้างหลักของเนื้อเทียม ส่งผลให้เนื้อเทียมสามารถขยายตัวออกได้เมื่อมีการปล่อยความดันไอน้ำออกจากระบบ ซึ่งจากผลการ

ทดลองของ Rhee และคณะ ที่แปรรูปเนื้อเทียมด้วยการกดอัดนั้น มีกลไกการสร้างเนื้อสัมผัสที่แตกต่างไปจากการเอกซ์ทรูชัน เนื่องจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีขั้นตอนการกวนผสมที่ทำให้แรงเหมือนกับวัตถุดิบอยู่แล้ว จึงทำให้โมเลกุลโปรตีนเกิดการแตกแยกและคลายตัวออกจากกันได้เป็นโมเลกุลสายยาวที่สามารถมาจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างร่างแหอย่างต่อเนื่องได้ และสร้างพันธะเคมีระหว่างโปรตีนขึ้นใหม่ในเนื้อเทียม ส่วนโพแทสเซียมโบรเมท มีกลไกการทำงานที่ไม่สอดคล้องกับกระบวนการเอกซ์ทรูชัน จึงไม่มีผลต่อการสร้างพันธะไคซัลไฟด์ในเนื้อเทียม นอกจากนี้จากผลการทดลองของ Rhee และคณะ และของ Cegla และคณะ (1978) แสดงให้เห็นว่าการเติมสารรีดิวซ์ซึ่งเพื่อไปลดระดับการเชื่อมโยงด้วยพันธะไคซัลไฟด์ในโครงสร้างของโปรตีน ทำให้เอกซ์ทรูเดมมีเนื้อสัมผัสที่ดีกว่าเอกซ์ทรูเดมที่ไม่ได้เติมสารรีดิวซ์ ซึ่งแสดงว่าการเอกซ์ทรูชันอาจทำให้โปรตีนคลายตัวออกเป็นโครงสร้างโมเลกุลแบบสายยาวได้ไม่สมบูรณ์นัก เมื่อเติมสารรีดิวซ์จึงสามารถไปช่วยทำลายพันธะไคซัลไฟด์ในระหว่างเอกซ์ทรูชันได้ ซึ่งขัดแย้งกับผลการทดลองของ Li และ Lee (1996b) ที่พบว่าการเอกซ์ทรูชันแป้งสาลีที่เติมซิสเตอีนซึ่งเป็นสารรีดิวซ์ ทำให้เอกซ์ทรูเดมมีโครงสร้างภายในและเนื้อสัมผัสที่ไม่ดี

4.4.2 ผลของแป้งสาลีต่อลักษณะทางกายภาพ

จากการศึกษาผลของแป้งสาลี ต่อเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมโปรตีนถั่วเหลือง ซึ่งแสดงข้อมูลในตารางที่ 4.6 พบว่าแป้งสาลีมีผลต่อเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียม โดยเนื้อเทียมที่มีแป้งสาลีเป็นส่วนผสม 20 เปอร์เซ็นต์ มีความเครียดไม่แตกต่างทางสถิติกับเนื้อเทียมโปรตีนถั่วเหลืองที่เป็นตัวอย่างควบคุม ($p > 0.05$) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งสาลีในเนื้อเทียมขึ้นเป็น 40 เปอร์เซ็นต์ พบว่าความเครียดของเนื้อเทียมมีค่าลดลง ($p < 0.05$) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากเนื้อเทียมที่มีแป้งสาลีเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 40 เปอร์เซ็นต์ มีอัตราการขยายตัวสูงขึ้น ($p < 0.05$) (ตารางที่ 4.6) ส่งผลให้เนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมอ่อนตัวและไม่แข็งแรง เนื่องจากโมเลกุลสตาร์ชมีสมบัติให้ความยืดหยุ่นแก่โครงสร้างของผลิตภัณฑ์อาหาร (นิธิยา รัตนานนท์, 2543; Harper, 1981) จึงทำให้เนื้อเทียมที่ส่วนผสมของแป้งสาลีมีอัตราการขยายตัวมากขึ้น โครงสร้างภายในที่เกิดการจัดเรียงตัวกันอย่างหลวมๆ ไม่แน่นหนา นอกจากนี้เนื้อเทียมที่มีปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองลดลง มีโครงสร้างหลักที่เกิดจากการจัดเรียงตัวเป็นเฟสต่อเนื่องของโปรตีนถั่วเหลืองมีความแข็งแรงลดลง รวมทั้งการที่อนุภาคสตาร์ชสาลีที่กระจายตัวในโครงสร้างของโดเนื้อเทียมนั้น อาจไปรบกวนการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างร่างแหที่ต่อเนื่องของโปรตีนถั่วเหลืองในโดได้ (Guy, 1994) ดังค่าดัชนีความสมบูรณ์ของโครงสร้างของเนื้อเทียมที่มีแป้งสาลี 40 เปอร์เซ็นต์ มีค่าต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อเทียมที่ไม่มีแป้งสาลีเป็นส่วนผสม ($p < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ตัวแปรของกระบวนการเอกซ์ทรูชัน และลักษณะทางกายภาพของเนื้อเทียมโปรตีนถั่วเหลืองที่เติมแป้งสาลี 0-40 เปอร์เซ็นต์

Extrusion parameters and Characteristics	Wheat flour (%)		
	0	20	40
Torque (%)	40.46	32.73	36.55
Die pressure (psi)	302.73	269.09	275.45
Expansion ratio	1.81b ⁽¹⁾	2.09ab	2.45a
Integrity index	0.90a	0.72ab	0.46b
Stress (g/cm ²)	2,577ab	3,081a	2,184b
Textural appearance score			
- Tearing	2.69b	7.25a	9.34a
- Fibrousness	4.61c	6.80b	8.93a

⁽¹⁾ ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอนหมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการตรวจสอบลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียม พบว่าการเติมแป้งสาลีในเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง ทำให้เนื้อเทียมมีลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้นอย่างชัดเจน โดยเนื้อเทียมที่มีระดับแป้งสาลีเพิ่มขึ้นมีลักษณะทางด้านการฉีกได้และความเป็นเส้นใยเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง ($p < 0.05$) (ตารางที่ 4.6) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากโปรตีนและสตาร์ชสาลี สามารถจัดเรียงตัวไปตามโครงสร้างสายยาวของโปรตีนถั่วเหลืองได้ ทำให้เกิดโครงสร้างภายในที่มีลักษณะของเส้นใยที่สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนขึ้น ประกอบกับการที่เนื้อเทียมที่มีแป้งสาลีเป็นส่วนผสมนั้นมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นด้วย จึงสามารถฉีกเนื้อเทียมออกจากกันได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่าเนื้อเทียมที่เติมแป้งสาลี 40 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณโปรตีนทั้งหมดต่ำกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 4.1) ซึ่งเป็นปริมาณโปรตีนต่ำที่สุดในการสร้างเนื้อสัมผัสของโปรตีนถั่วเหลืองด้วยการเอกซ์ทรูชันที่ Kearns และคณะ (1989) ได้นำเสนอไว้ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากแป้งสาลีที่มีส่วนช่วยปรับปรุงโครงสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียม จึงทำให้แปรรูปเนื้อเทียมด้วยการเอกซ์ทรูชันได้ จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าแป้งสาลีทำให้การสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน โดยทำให้เนื้อเทียมมีอัตราการขยายตัวสูงขึ้น รวมทั้งมีลักษณะปรากฏทางด้านการฉีกได้และความเป็นเส้นใยเพิ่มขึ้นมาก โดยที่ไม่ได้ส่งผลต่อสมบัติทางด้านการไหลของโคในระบระหว่างการเอกซ์ทรูชันมากนัก เนื่องจากเนื้อเทียม

ที่มีส่วนผสมของแป้งสาลีมีค่าเทอร์คและความดันที่หัวแบบ ไม่แตกต่างทางสถิติกับของเนื้อเทียมไม่ได้เติมแป้งสาลี ($p>0.05$) (ตารางที่ 4. 6)

4.4.3 ผลของโปรตีนกลูเตนสาลี สตาร์ชสาลี และแป้งสาลีต่อลักษณะทางกายภาพ

จากการทดลองผลของแป้งสาลีต่อเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมในหัวข้อ 4.4.2 ข้างต้น ได้นำมาสู่การศึกษาบทบาทขององค์ประกอบของแป้งสาลี ได้แก่ โปรตีนกลูเตนสาลี และสตาร์ชสาลี ที่มีต่อลักษณะทางกายภาพของเนื้อเทียม โดยเติมโปรตีนกลูเตนสาลีและสตาร์ชสาลี ในวัตถุดิบที่มีส่วนผสมหลักเป็นแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมันและโปรตีนถั่วเหลืองสกัด และควบคุมให้เนื้อเทียมมีปริมาณโปรตีนทั้งหมดใกล้เคียงกันในช่วง 58-59 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.2 จากผลการทดลองในตารางที่ 4.7 พบว่าเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของกลูเตนสาลี มีความเครียด และลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางด้านการนึ่งได้และความเป็นเส้นใย ไม่แตกต่างทางสถิติกับเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองซึ่งเป็นตัวอย่างควบคุม ($p>0.05$) ซึ่งอาจเป็นผลจากการที่กลูเตนสาลีสามารถเข้าร่วมในโครงสร้างของโปรตีนถั่วเหลืองได้ จึงทำให้มีลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างแบบเส้นใยไม่แตกต่างจากโครงสร้างของเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของโปรตีนถั่วเหลืองเพียงอย่างเดียว แต่ทั้งนี้เนื้อเทียมที่เติมกลูเตนสาลีมีอัตราการขยายตัวต่ำกว่าเนื้อเทียมชนิดอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ทำให้เนื้อเทียมที่มีกลูเตนสาลีเป็นส่วนผสมมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวใกล้ชิดกันมาก จึงไม่สามารถนึ่งเนื้อเทียมออกจากกันตามแนวยาวได้ และไม่สามารถสังเกตลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยของเนื้อเทียมได้ เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของสตาร์ชสาลีที่มีอัตราการขยายตัวสูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Neumann, Jasberg และ Wall (1984) ที่พบว่าเอกซ์ทรูเดตที่มีส่วนผสมของกลูเตนข้าวโพดและแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมันในอัตราส่วน 50 ต่อ 50 เปอร์เซ็นต์ มีเนื้อสัมผัสที่เกาะตัวกันแน่น ไม่ค่อยพองตัว และมีโครงสร้างแบบเส้นใยคล้ายคลึงกับเอกซ์ทรูเดตของแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน ในขณะที่เอกซ์ทรูเดตที่มีส่วนผสมของกลูเตนข้าวโพดเพียงอย่างเดียว นั้น ไม่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยของโครงสร้างภายใน ซึ่งจากการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่ากลูเตนสาลีไม่มีส่วนช่วยปรับปรุงการจัดเรียงตัวของเส้นใยของเนื้อเทียมให้ดีขึ้น แต่อาจมีส่วนช่วยทำให้เนื้อเทียมมีความแข็งแรงมากขึ้น

ตารางที่ 4.7 ตัวแปรของเอกซ์ทรูชันและลักษณะทางกายภาพของเนื้อเทียมโปรตีนถั่วเหลืองที่เติมโปรตีนกลูเตน สตาร์ชสาลี แป้งสาลี และส่วนผสมของกลูเตน และสตาร์ชสาลี

Extrusion parameters and Characteristics	DSF+SPI ⁽¹⁾	DSF+SPI+WG ⁽²⁾	DSF+SPI+WS ⁽³⁾	DSF+SPI+WF ⁽⁴⁾	DSF+SPI+WS+WG ⁽⁵⁾
Torque (%)	53.57c ⁽⁶⁾	70.00a	70.00a	62.14b	63.75ab
Die pressure (psi)	408.57c	655.71a	632.86a	528.57b	620.00ab
Expansion ratio	2.06c	1.78d	2.60ab	2.76a	2.48b
Stress (g/cm ²)	2,443a	2,854a	2,335ab	1,798b	2,393ab
Textural appearance score					
- tearing	3.27bc	2.24c	5.36ab	5.27ab	6.71a
- fibrousness	3.74b	3.39b	4.94ab	5.08ab	6.50a

(1)เนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน 80 % และ โปรตีนถั่วเหลืองสกัด 20 %

(2)เนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน 80 % โปรตีนถั่วเหลืองสกัด 10 % และกลูเตนสาลี 10 %

(3)เนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน 44 % โปรตีนถั่วเหลืองสกัด 40 % และสตาร์ชสาลี 16 %

(4)เนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน 40 % โปรตีนถั่วเหลืองสกัด 40 % และแป้งสาลี 20 %

(5)เนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน 40 % โปรตีนถั่วเหลืองสกัด 40 % กลูเตน 2.8 % และสตาร์ชสาลี 17.2 %

(6) ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอนหมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เมื่อศึกษาบทบาทของสตาร์ชสาลีที่มีต่อการสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียม พบว่าสตาร์ชสาลีมีส่วนช่วยพัฒนาการจัดเรียงตัวแบบเส้นใยของเนื้อเทียม โดยทำให้เนื้อเทียมที่มีสตาร์ชสาลีเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ เนื้อเทียมที่เติมสตาร์ชสาลีเนื้อเทียมที่เติมแป้งสาลี และเนื้อเทียมที่เติมส่วนผสมระหว่างสตาร์ชสาลีและกลูเตนสาลีมีลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางการฉีกได้และความเหนียวมากกว่าเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.8 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากสตาร์ชสาลีมีโครงสร้างที่ใหญ่ และไม่สามารถเข้าร่วมกับโปรตีนถั่วเหลืองได้ จึงกระจายตัวพร้อมทั้งแยกเฟสโปรตีนถั่วเหลืองออกจากกัน จึงทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของโครงสร้างภายในที่มีลักษณะแบบเส้นใยของเนื้อเทียมเด่นชัดขึ้น นอกจากนี้จากการที่สตาร์ชสาลีสามารถขยายตัวได้ดีกว่าโปรตีน (Mohamed, 1990) จึงสามารถเพิ่มความยืดหยุ่นแก่ผลิตภัณฑ์อาหารได้ดีกว่าโปรตีน ซึ่งเห็นได้จากการที่เอกซ์ทรูเดตที่มีองค์ประกอบของสตาร์ชสาลีมีอัตราการขยายตัวสูงกว่าเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง และเนื้อเทียมที่เติมกลูเตนสาลีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Conway และ Anderson (1973) ที่

พบว่าเอกซ์ทรูเดตของแป้งข้าวโพดที่ไม่มีส่วนผสมของ SPI มีอัตราการขยายตัวสูงกว่าเอกซ์ทรูเดตที่มีส่วนผสมของ SPI แต่ทั้งนี้ยังพบว่าเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมที่มีองค์ประกอบของสตาร์ชสาลี มีความเครียดไม่แตกต่างทางสถิติกับเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง ($p < 0.05$) จากผลการทดลองนี้ แสดงให้เห็นว่าการเติมแป้งสาลีในวัตถุดิบสำหรับแปรรูปเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง ทำให้เนื้อเทียมมีลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางการฉีกได้และความเป็นเส้นใยเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากกลูเตนสาลีที่มีส่วนช่วยปรับปรุงให้เนื้อเทียมมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างภายในแบบเส้นใยมากขึ้น

4.5 สรุปผลการทดลอง

การนำโพแทสเซียมโบรเมท 60-180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มาใช้ในการแปรรูปเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง ไม่ได้ส่งผลให้โครงสร้างของโปรตีนเกิดการเชื่อมโยงด้วยพันธะไดซัลไฟด์เพิ่มขึ้น จึงไม่ได้ทำให้เนื้อสัมผัสของเนื้อเทียม รวมทั้งลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางการฉีกได้และความเป็นเส้นใยดีขึ้น จึงไม่ควรนำโพแทสเซียมโบรเมทมาใช้ในการผลิตเนื้อเทียมด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน การนำแป้งสาลีมาเป็นส่วนผสมของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง ทำให้เนื้อเทียมมีอัตราการขยายตัวและลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางการฉีกได้ และความเป็นเส้นใยเพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้เนื้อเทียมที่มีส่วนผสมแป้งสาลี 20 เปอร์เซ็นต์ มีเนื้อสัมผัสที่แข็งแรงกว่าเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้งสาลี 40 เปอร์เซ็นต์ จึงถือว่าปริมาณแป้งสาลี 20 เปอร์เซ็นต์เป็นระดับที่เหมาะสมต่อการนำมาเป็นส่วนผสมในวัตถุดิบสำหรับแปรรูปเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง

เมื่อศึกษาบทบาทสตาร์ชสาลี และกลูเตนสาลี ที่มีต่อการสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองที่เติมแป้งสาลี สามารถอธิบายได้ว่าสตาร์ชสาลีมีส่วนช่วยปรับปรุงการสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมโปรตีนถั่วเหลือง โดยทำให้เนื้อเทียมมีอัตราการขยายตัวที่ดี และมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างที่มีลักษณะแบบเส้นใยของเนื้อเทียมเด่นชัดขึ้น ส่วนกลูเตนสาลีไม่ได้มีส่วนช่วยปรับปรุงลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางการฉีกได้ และความเป็นเส้นใยของเนื้อเทียมให้ดีขึ้น แต่มีผลต่อทางด้านความแข็งแรงของเนื้อเทียม

4.6 รายการอ้างอิง

- กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. ศูนย์สารสนเทศการเกษตร. (2547). **สถิติการค้าสินค้าเกษตรกรรมไทยกับต่างประเทศ ปี พ.ศ. 2546**. เอกสารทางสถิติ การเกษตรเล่มที่ 404. กรุงเทพมหานคร.
- ปราณี วราสวัสดิ์. (2537). **เทคโนโลยีผลิตภัณฑ์ชุมชนพืช**. ภาควิชาอุตสาหกรรมการเกษตร. คณะธุรกิจการเกษตร. สถาบันเทคโนโลยีการเกษตรแม่โจ้: เชียงใหม่.
- วิบูลิศา จันทร์พรชัย, เพ็ญขวัญ ชมปรีดา และวิชัย หฤทัยธนาสันดี. (2537). **การพัฒนาผลิตภัณฑ์จากโปรตีนถั่วลิสงแปลงเนื้อสัมผัส**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพมหานคร. (การประชุมเชิง วิชาการครั้งที่ 32, 3-5 กุมภาพันธ์ 2537).
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2532). **เคมีทางสัตววิทยาอาหาร**. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. คณะอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพมหานคร.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2540). **ข้าวสาลี: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. พิมพ์ครั้งที่ 2. เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชัน: กรุงเทพมหานคร.
- Adachi, M., Chunying, H. and Utsumi, S. (2004). Effects of designed groups and disulfide bonds in to soybean proglycinin on its structural stability and heat-induced gelation. **J. of Agric. Food Chem.** (Online). Available <http://www.sciencedirect.com>
- Arêas, J.A.G. (1992). Extrusion of food proteins. **Criti. Rev. Food Sci. Nutri.**, 32: 365-392.
- Badrie, N. and Mellowes, W.A. (1992). Soybean flour/oil and wheat bran effects on characteristics of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) flour extrudate. **J. of Food Sci.** 57(1): 108-111.
- Ballard, A., DeMarco, J. M., Lamkey, J. W. and Jevne, G. (2003). **Process and system for forming pieces of meat analog**. U.S. Patent Application. 20030211228.
- Bhattacharya, M. and Hanna, M.A. (1988). Effect of lipid on the properties of

- extruded product. **J. Food Sci.** 53: 1230-1231.
- Boison, G., Taranto, M.V. and Cheryan, M. (1983). Extrusion of defatted soy flour-hydrocolloid mixtures: Effect of operating parameters of selected textural and physical properties. **J. Food Technol.** 18: 719-730.
- Camire, M.E. (1998). Chemical change during extrusion cooking. In P. Zeuthen, J.C. Cheftel, C. Eriksson, T.R. Gormley, P. Linko and K. Paulus (eds.), **Processing and quality of foods.** pp. 109-121. Plenum Press: New York, USA.
- Cegla, G.F., Taranto, M.V., Bell, K.R. and Rhee, K.C. (1978). Microstructure of textured cottonseed flour blends. **J. of Food Sci.** 43: 775-779.
- Colonna, P., Doublier, J.L., Melcion, J.P., de Monredon, F. and Mercier, C. (1984). Physical and functional properties of wheat starch after extrusion-cooking and drum-drying. In P. Zeuthen, J.C. Cheftel, C. Eriksson, M. Jul, H. Leniger, P. Linko, G. Varela, and G. Vos. **Thermal processing and quality of foods.** pp. 96-105. Elsevier Science: New York, USA.
- Cornel, H.J. and Hoveling, A.W. (1998). **Wheat chemistry and utilization.** Technomic Publishing: Pennsylvania, USA.
- Ding, Q.B., Aninworth, P., Plunkett, A., Tueker, G. and Marson, H. (2005). Effect of extrusion conditions on the functional and physical properties of wheat-based expanded snacks. **J. of Food Eng.** Article in press.
- Faubion, J.M. and Hosney, R.C., (1982). High-temperature short-time extrusion cooking of wheat starch and flour. II Effect of protein and lipid on extrudate properties. **Cereal Chem.** 59(6): 533-537.

- Firedman, M. (1994). Improvement in the safety of foods SH-containing amino acids and peptides: a review. **J. of Agric. Food Chem.** 42: 3-20.
- Gropper, M., Morayu, C.I. and Kokini, J.I. (2002). Effect of specific mechanical energy on properties of extruded protein-starch mixtures. **Cereal Chem.** 79(3): 429-433.
- Guingamp, M. F. and Humbert, G. (1999). Screening procedure for evaluation heat load in commercial milks. **Lait.** 79: 457-463.
- Guy, R. C. E. (1994). Raw material for extrusion cooking processes. In N. Frame (ed.), **The technology of extrusion cooking.** pp.52-72. American Association of Cereal Chemists: St. Paul, MN., USA.
- Harper, J.M. (1981). **Extrusion of foods. Vol. II.** CRC Press: Florida, USA.
- Ilo, S. and Berghofer, E. (1999). Kinetics of color change during extrusion of maize grits. **J. of Food Eng.** 39:73-80.
- Kearns, J.P., Rokey, G.J. and Huber, G.R. (1989). Extrusion of texturized proteins. In T.H. Applewhite (ed.), **Proceedings of the world congress on vegetable protein utilization in human foods and animal feedstuffs.** American Oil Chemistry Society: Champaign IL, USA.
- Kohman, H.A., Hoffman, C. and Godfreg, T.M. (1915). **Manufacture of bread.** U.S. Patent. 1,148,328.
- Ledward, D.A. and Tester, R.F. (1994). Molecular transformations of proteinaceous foods during extrusion processing. **Trends in Food Sci. and Technol.** 5: 117-120.

- Li, M. and Lee, T.C. (1996a). Effect of extrusion temperature on solubility and molecular weight distribution of wheat flour proteins. **J. of Agric. Food Chem.** 44: 763-768.
- Li, M. and Lee, T.C. (1996b). Effect of cysteine on the functional properties and microstructure of wheat flour extrudates. **J. of Agric. Food Chem.** 44: 1871-1880.
- Li, M. and Lee, T.C. (1997). Relationship of the extrusion temperature and the solubility and disulfide bond distribution of wheat proteins. **J. of Agric. Food Chem.** 45: 2711-2717.
- Li, M. and Lee, T.C. (1998). Effect of cysteine on the molecular weight distribution and disulfide cross-link of wheat flour proteins in extrudates. **J. of Agric. Food Chem.** 46: 846-853.
- Lin, S., Huff, H.E. and Hsieh, F. (2000). Texture and chemical characteristics of soy protein meat analog extruded at high moisture. **J. of Food Sci.** 65(2): 264-269.
- Lin, S., Huff, H.E. and Hsieh, F. (2002). Extrusion process parameters, sensory characteristics, and structural properties of a high moisture soy protein meat analog. **J. of Food Sci.** 67(3): 1066-1072.
- Lowton, J.W., Davis, A.B. and Behnke, K.C. (1985). High-temperature, short-time extrusion of wheat gluten and a bran-like fraction. **Cereal Chem.** 62(4): 267-271.
- Marino, R.P., Rothamel, R.J. and Rieken, W.C. (1983). **Expanded textured protein product and method for making same.** U.S. Patent. 4,418,086.

- Meuser, F., Gimmler, N. and van Lengerich, B. (1992). A system analytical approach to extrusion. In J.L. Kokini, C. Ho and M.V. Karwe (eds.), **Food extrusion science and technology**. pp. 619-630. Marcel Dekker: New York, USA.
- Mohamed, S. (1990). Factor affecting extrusion characteristics of expanded food products. **J. Food Proc. Preserv.**14: 437-452.
- Murkies, A.L., Lombard, C. Strauss, B. J. G., Wilcok, G. Burger, H.G. and Morton, M.S. (1995). Dietary flour supplementation decrease post-menopausal hot flush: Effect of soy and wheat. **Maturitas**. 21: 189-195.
- Nestl, B. and Seibel, B. (1990). Optimization of formulas for extruded long-life baked goods with a modified nutritive value. In F. Shahidi, C.H. Ho and N. van Chuyen. (eds), **Process-induced chemical changes in food**. pp. 1.226-1.236. Elsevier Science: New York, USA.
- Neumann, P.E., Jasberg, B.W. and Wall, J.S. (1984). Uniquely textured products obtained by coextrusion of corn gluten meal and flour. **Cereal Chem.** 61: 439-445.
- Panuzzo, J.F., O, Brien, L., Mac Ritchie, F. and Bekes, F. (1990). Baking quality of Australian wheat cultivars varying in their free lipid composition. **J. Cereal Sci.** 11: 51-57.
- Rebello, C.A. and Schaich, K.M. (1999). Extrusion chemistry of wheat flour protein: II Sulfhydryl-disulfide content and protein structure changes. **Cereal Chem.** 76(5): 756-763.
- Redl, A., Morel, M., Vergnes, B. and Guilbert S. (2000). Rheological and biochemical approaches describing changes in molecular structure of

- gluten protein during extrusion. In P.R. Shewry and A.S. Tatham (eds.), **Wheat gluten**, pp. 430-440. MPG Books: Cornwall, England.
- Schofield, J.D. (1994). Wheat proteins: structure and functionality in milling and breadmaking. In W. Bushuk and V.F. Rasper (eds.), **Wheat production, properties and quality**. pp.73-106. Chapman and Hall: Glasgow, England.
- Sheard, P.R., Ledward, D.A. and Mitchell, J.R. (1984). Role of carbohydrates in soya extrusion. **J. Food Tech.**19: 475-483.
- Shimada K. and Cheftel, J.C. (1988). Determination of sulfhydryl groups and disulfide bonds in heat-induced gels of soy protein isolate. **J. of Agric. Food Chem.** 36: 147-153.
- Singh, N. and Smith, A.C. (1997). A comparison of wheat starch, whole wheat meal and oat flour in extrusion cooking process. **J. of Food Eng.** 34: 15-32.
- Toufeili, I., Lombert, I.A. and Kokini, J.L. (2000). Effect of glass transition and cross-linking on rheological properties of gluten: Development of a preliminary state diagram. **Cereal Chem.** 79(1): 138-142.
- van Lengerish, B. (1997). Influence of extrusion processing on In- line rheology behavior, structure and function of wheat starch. In H. Faridi and J.M. Faubion (eds.), **Dough rheology and baked product texture**. pp. 421-471. Asia Printograph: New Delhi, India.
- Wenger, L. V. G., Osterhaus, E. J. and Smith, O. B. (1976). **Method of preparing dense, uniformly layered protein meat analogue**. U. S. Patent 3,970,761.
- Wrigley, C.W. and Bietz, J.A. (1988). Protein and amino acids. In Y. Pomeranz (ed.), **Wheat: chemistry and technology**. Vol. I. 3rd. pp. 159-275. American Association of Cereal Chemists: Minnesota, USA.

- Yuryev, V.P., Zasytkin, D.V., Alexeyev, V.V. and Bogatyryev, A.N. (1995).
Expansion ratio of extrudates prepared from potato starch-soybean protein
mixtures. **Carb. Polym.** 26: 215-218
- Zasytkin, D.V. and Lee, T. C. (1998). Extrusion of soybean and wheat flour as
affected by moisture content. **J. of Food Sci.** 63(6): 1058-1061.
- Zasytkin, D.V., Yuryev, V.P., Alexeyev, V.V. and Tolstoguzov, V.B. (1992).
Mechanical properties of the products obtained by the thermoplastic
extrusion of potato starch-soybean protein mixtures. **Carb. Polym.**
18: 119-124.
- .

บทที่ 5

ผลของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มต่อสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และ สมบัติเชิงหน้าที่ของเนื้อเทียมโปรตีนถั่วเหลือง

EFFECT OF FULL FAT SOY FLOUR ON CHEMICAL, PHYSICAL, AND FUNCTIONAL PROPERTIES OF SOY PROTEIN MEAT ANALOG

5.1 บทคัดย่อ

การทำเอกซ์ทรูชันของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ เพื่อศึกษาผลของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มที่ระดับ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการเติมแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มไม่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณของ พันธะไฮโดรเจน อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไดซัลไฟด์ ที่เชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลโปรตีน การเติมแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มในวัตถุดิบสำหรับแปรรูปเนื้อเทียมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงทอร์ค ความดันที่หัวแบบ และความสว่าง (L) ของเนื้อเทียมลดลงมาก ($p < 0.05$) แต่มีสีเหลือง (+b) เพิ่มขึ้นมาก ($p < 0.05$) เนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 20 เปอร์เซ็นต์ มีลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางด้านการฉีกและความเป็นเส้นใย อัตราการขยายตัว และความสามารถในการกักเก็บน้ำ ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่พบการลดลงของความเครียด และความหนาแน่นจำเพาะ เมื่อดูการจัดเรียงตัวของโครงสร้างภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสแตอริโอ พบว่ามีการจัดเรียงตัวของเส้นใยยาวต่อเนื่อง และปรากฏช่องรูพรุนทั้งขนาดเล็กและใหญ่ แต่เมื่อปริมาณแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มในเนื้อเทียมเพิ่มขึ้นถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เนื้อเทียมมีความเครียดและความหนาแน่นจำเพาะเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) เมื่อดูโครงสร้างภายในของเนื้อเทียม ไม่ปรากฏโครงสร้างแบบเส้นใย มีช่องรูพรุนขนาดเล็กจำนวนน้อย และมีเนื้อสัมผัสที่เกาะตัวเชื่อมเป็นเนื้อเดียวกัน จึงทำให้เนื้อเทียมมีลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางด้านการฉีกได้และความเป็นเส้นใยน้อย รวมทั้งอัตราการขยายตัว และความสามารถในการกักเก็บน้ำของเนื้อเทียมลดลงมาก ($p < 0.05$) ดังนั้นความสมบูรณ์ของโครงสร้างของเนื้อเทียมที่มีแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเพิ่มขึ้นถึง 40 เปอร์เซ็นต์ มีค่าลดลงมาก ($p < 0.05$)

5.2 บทนำ

การผลิตแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม สามารถทำเป็นอุตสาหกรรมในครัวเรือนและในระดับชุมชนได้ เนื่องจากมีขั้นตอนการผลิตที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ซึ่งทำได้โดยการนำเมล็ดถั่วเหลืองที่แยกเปลือกออกแล้วไปผ่านการให้ความร้อน แล้วนำไปบดเป็นแป้งถั่วเหลืองที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันตามประเภทของการนำไปใช้งาน ทั้งนี้มีการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาให้แป้งถั่วเหลืองให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น โดยนำแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มที่ผ่านการบดแล้วเข้าสู่กระบวนการหุงต้มแบบเอกซ์ทรูชัน (extrusion cooking) ที่ให้ความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพและต่อเนื่อง มีการผสมภายในบารเรลที่ก่อให้เกิดแรงเสียดสีและแรงเฉือนอย่างรุนแรง ซึ่งสามารถทำให้เอนไซม์ไลพอกซีเดส (lipoxydase) และยูรีเอส (urease) เกิดการสูญเสียสภาพ รวมทั้งสารที่ไม่ทนต่อความร้อนถูกทำลายไป จากงานวิจัยของ Peribla, Cruz, De Belalcázar และ Diaz (1997) พบว่ากระบวนการเอกซ์ทรูชันช่วยปรับปรุงคุณภาพของโปรตีนของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม สามารถลดการทำงานของตัวยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ทริปซิน (trypsin inhibitor) และสารต่อต้านโภชนาการ (antinutritional factor) พวกเลคติน (lectin) และซาโปนิน (saponins) ได้ ทำให้อัตราการเจริญเติบโต การรับอาหาร และประสิทธิภาพการนำโปรตีนไปใช้ในสัตว์พวกไก่และหมูดีขึ้น ทำให้แป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มมีกลิ่นรส และความทนทานต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ดีขึ้นอีกด้วย (Mustakas et al., 1970)

ผลิตภัณฑ์อาหารจากธัญพืชทั่วไป มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูง แต่มีโปรตีนน้อย จึงให้สารอาหารต่ำ ไม่เหมาะสมต่อการบริโภคของเด็กในวัยเรียน ดังนั้นจึงได้มีการนำแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มมาเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารมีโปรตีนสูงขึ้น และให้พลังงานเพียงพอกับความต้องการของร่างกาย (Gwiazada, Noguchi, and Saio, 1987; Charoenphol, Boonyasirikoon, and Suanpan, n.d.; McCabe, 1991; Hayakawa, 1992) ในปี ค.ศ. 1991 McCabe ได้แปรรูปผลิตภัณฑ์ทดแทนเนื้อสัตว์จากแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มด้วยการให้อุณหภูมิที่มีความดันสูงกับแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มที่อยู่ในสถานะของเหลวที่มี pH 4.5-6.5 ได้ขึ้นของโปรตีนที่แข็งแรง ไม่มีกลิ่นรสที่ไม่ดี ทั้งยังมีลักษณะปรากฏและเนื้อสัมผัสคล้ายเนื้อสัตว์สามารถนำไปใช้กับอาหารแช่แข็ง และอาหารกระป๋องได้ แต่ในปัจจุบันนิยมผลิตเนื้อเทียมด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ มีต้นทุนในการผลิตต่ำ ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส และความรู้สึกในปากคล้ายเนื้อสัตว์มาก จากการทดลองของสมชาย ประภาวัต (2532) ที่ผลิตเนื้อเทียมหรือโปรตีนเกษตรจากแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มด้วยเครื่องวิลเลจเทคเจอร์ไรเซอร์ (village texturizer) พบว่าเมื่อใช้วัตถุดิบที่ความชื้นต่ำประมาณ 35-40 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 160-190 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีการพองตัว สี รูปร่างของ

ผลิตภัณฑ์เป็นที่ยอมรับของผู้ทดสอบมากกว่าเนื้อเทียมที่ผลิตที่ความชื้นสูง 45 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิสูง 200-210 องศาเซลเซียส

Gwiazada และคณะ (1978) รายงานว่าการผลิตเนื้อเทียมแป็งั่วเหลืองไขมันเต็มที่แปรงรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันของแป็งั่วเหลืองไขมันเต็ม ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีโครงสร้างแบบเส้นใยเนื่องจากไขมันที่มีอยู่เป็นสารหล่อลื่น (lubricant) ปลอดภัยและลดการจัดเรียงตัวของอนุภาคลงได้ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะไม่แน่นอนหนา ไม่พองตัว และมีความสามารถในการดูดซับน้ำต่ำ (Bhattacharya and Hanna, 1988; Badrie and Mellows, 1992; Cheftel, Kitagawa, and Quegviner, 1992) ส่วนผลการศึกษาของ Hayakawa (1992) พบว่าเนื้อเทียมที่ทำจากแป็งั่วเหลืองไขมันเต็มที่มีไขมันอยู่ 25 เปอร์เซ็นต์ ด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่มีลักษณะโครงสร้างและเนื้อสัมผัสที่ดี แต่มีรูพรุนขนาดใหญ่เกิดขึ้น โดยมีไขมันเป็นส่วนประกอบของผนังรูพรุนนั้น จึงมีส่วนทำให้ความแน่นเนื้อของผลิตภัณฑ์ลดลง โดย Kearns, Rokey และ Huber (1989) พบว่าการผลิตเนื้อเทียมจากวัตถุดิบที่มีไขมันอยู่ 0.5-6 เปอร์เซ็นต์ นั้นจำเป็นต้องเพิ่มพลังงานในการเชื่อมและอุณหภูมิในการแปรงรูปให้สูงขึ้น โดยการนำรูปแบบการจัดเรียงสกรูที่ให้แรงเชื่อมสูงๆ มาใช้ในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pilli และคณะ (2004) ที่พบว่าการเพิ่มความเร็วยรอบของสกรู การลดความชื้นของวัตถุดิบ และการให้อุณหภูมิสูง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี และมีการเสียไขมันน้อยที่สุด ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป็งั่วเหลืองไขมันเต็มที่นอกจากจะมีโปรตีนสูง มีกรดไขมันที่จำเป็นต่อร่างกาย และไม่คอลลอเรียลแล้ว ยังมีลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส และความรู้สึกในปากคล้ายเนื้อสัตว์ โดยไขมันที่มีอยู่นั้นทำให้เนื้อเทียมมีความนุ่ม ฉ่ำน้ำ และความเลี่ยนมัน ที่ให้ความรู้สึกคล้ายเนื้อสัตว์มากขึ้น นอกจากนี้แป็งั่วเหลืองไขมันเต็มเป็นแป็งั่วเหลืองเพียงชนิดเดียวที่สามารถผลิตได้เองภายในประเทศ จึงทำให้แป็งั่วเหลืองไขมันเต็มมีราคาถูกลง ดังนั้นเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมแป็งั่วเหลืองไขมันเต็มก็มีราคาต่ำลงตามไปด้วย ซึ่งอาจเป็นเหตุผลให้ผู้บริโภคหันมาสนใจบริโภคผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมกันมากขึ้น ทั้งนี้ยังมีส่วนช่วยลดการนำเข้าของแป็งั่วเหลืองพร่องไขมันและโปรตีนถั่วเหลืองสกัดจากต่างประเทศได้ในอีกทางหนึ่ง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงหน้าที่ และพันธะเคมี ของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่เติมแป็งั่วเหลืองไขมันเต็มในระดับต่างๆ เมื่อผลิตภายใต้สภาวะการเอกซ์ทรูชันเดียวกัน

5.3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

5.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

นำแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน (defatted soy flour: DSF) โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (soy protein isolate: SPI) (Profam 970) จากบริษัท ADM Protein Specialties (Decatur, IL, USA.) แป้งสาธิตราหงส์ขาวจากบริษัทยูไนเต็ดฟลาวมิลล์ จำกัด (มหาชน) และแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม (full fat soy flour: FSF) จากบริษัทคอคอยคำ ผลิตภัณฑ์ จำกัด มาผสมกันโดยควบคุมปริมาณ SPI และแป้งสาธิตเป็น 30 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเติม FSF ลงในวัตถุดิบในปริมาณ 0 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ (w/w) โดยแทนที่ปริมาณ DSF ดังตารางที่ 5.1 เก็บวัตถุดิบและวัตถุดิบที่ผสมแล้วในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในระหว่างรอการแปรรูป และทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ DSF, SPI, แป้งสาธิต และ FSF ได้แก่ ปริมาณความชื้น โปรตีน และไขมัน ด้วยวิธีของ AOAC (1995)

ตารางที่ 5.1 ปริมาณส่วนผสม โปรตีน และไขมันในวัตถุดิบสำหรับแปรรูปเนื้อเทียม 6 สูตร ที่มีส่วนผสมของ FSF 0-50 เปอร์เซ็นต์

Formula	SPI ⁽¹⁾ (%)	WF ⁽²⁾ (%)	DSF ⁽³⁾ (%)	FSF ⁽⁴⁾ (%)	Protein content (%)	Lipid content (%)
1	30	20	50	0	54.8	0.85
2	30	20	40	10	53.8	2.73
3	30	20	30	20	52.8	4.63
4	30	20	20	30	51.8	6.53
5	30	20	10	40	50.8	8.43
6	30	20	0	50	49.8	10.33

(1)โปรตีนถั่วเหลืองสกัด

(2)แป้งสาธิต

(3)แป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน

(4)แป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม

5.3.2 การแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

นำวัตถุดิบที่มีส่วนผสมของ FSF ที่ระดับ 0-50 เปอร์เซ็นต์ ทั้ง 6 สูตรมาป้อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ตามการทดลองที่ 3.3.3 ในบทที่ 3 นำผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่ได้ไปอบแห้งในตู้อบร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จนกระทั่ง

ผลิตภัณฑ์มีความชื้นไม่เกิน 9 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักและนำไปเก็บไว้ในห้องเย็นก่อนที่จะนำไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและทางเคมี

5.3.3 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลด้วยการวิเคราะห์หว่าเรียนซ์ (Analysis of variance: ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรม Statistical Analysis System (SAS) version 9.0

5.3.4 การตรวจสอบลักษณะของผลิตภัณฑ์

5.3.4.1 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ

- 1) ลักษณะทางเนื้อสัมผัส ตามวิธีการในบทที่ 3
- 2) ลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสตามวิธีการในบทที่ 3
- 3) ลักษณะโครงสร้างภายใน

เตรียมตัวอย่างหลังอบแห้ง โดยตัดเนื้อเทียมออกเป็นชิ้นบาง ๆ ขนาด กว้าง 0.4 เซนติเมตร ยาว 0.6 เซนติเมตร และหนา 0.2 เซนติเมตร แล้วส่องดูโครงสร้างภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (SMZ-U Stereo Microscope, Nikon Corporation, Japan) และถ่ายภาพตัวอย่างตามขวาง และภาพถ่ายตามยาวที่กำลังขยาย 12 และ 30 เท่า

5.3.4.2 การตรวจสอบสมบัติทางเคมี

ตรวจสอบความสามารถในการละลายของโปรตีน และวัดความเข้มข้นของโปรตีน ตามวิธีการในบทที่ 3 ซึ่งใช้บัฟเฟอร์ในการสกัด 6 ชนิด ได้แก่ (1) สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.035 โมลาร์ pH 7.6 (P) (2) สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (sodium dodecyl sulphate) ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์ pH 7.6 (P+SDS) (3) สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มียูเรีย (urea) ความเข้มข้น 8 โมลาร์ pH 7.6 (P+Urea) (4) สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีเมอแคปโทเอทานอล (2-mercaptoethanol) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ pH 7.6 (P+ME) (5) สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มียูเรียความเข้มข้น 8 โมลาร์ และโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์ pH 7.6 (P+U+S) (6) สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์ ยูเรีย ความเข้มข้น 8 โมลาร์ และเมอแคปโทเอทานอล ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ pH 7.6 (P+S+U+M) โดยเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์โปรตีนที่ละลายได้เพิ่มขึ้นระหว่าง P+S+U+M กับ P+ME เพื่อศึกษาผลของ SDS+Urea และ

เปอร์เซ็นต์โปรตีนที่ละลายได้เพิ่มขึ้นระหว่าง P+S+U+M กับ P+S+U เพื่อศึกษาผลของ ME ตามการคำนวณต่อไปนี้

$$\text{โปรตีนที่ละลายได้เพิ่มขึ้นเมื่อเติม ME (\%)} = \frac{[(P+S+U+M) - (P+S+U)]}{(P+S+U)} \times 100$$

$$\text{โปรตีนที่ละลายได้เพิ่มขึ้นเมื่อเติม SDS+Urea (\%)} = \frac{[(P+S+U+M) - (P+ME)]}{(P+ME)} \times 100$$

5.3.4.3 การตรวจสอบสมบัติเชิงหน้าที่

- 1) ดัชนีความสมบูรณ์ของโครงสร้าง ตามวิธีการในบทที่ 4
- 2) ความหนาแน่นจำเพาะ (piece density)

ตรวจสอบความหนาแน่นของตัวอย่างเนื้อเยื่อด้วยวิธีการแทนที่ด้วยทราย โดยการชั่งน้ำหนักบีกเกอร์พลาสติก (W_1) ที่ทราบปริมาตรแน่นอน (V) เติมทรายลงในภาชนะให้ล้นแล้วเคาะบีกเกอร์ 20 ครั้งและใช้ไม้บรรทัดกวาดทรายตามแนวปากบีกเกอร์ออกและบันทึกน้ำหนักของบีกเกอร์ที่มีทราย (W_2) เติมทรายลงในภาชนะส่วนหนึ่ง สุ่มชิ้นตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักแน่นอน (W_3) ใส่ลงไปในภาชนะ เติมทรายลงไปให้ล้นบีกเกอร์แล้วเคาะภาชนะ 20 ครั้งและใช้ไม้บรรทัดกวาดทรายตามแนวขอบบนของบีกเกอร์ออก บันทึกน้ำหนักของบีกเกอร์ที่มีตัวอย่างและทรายไว้ (W_4) ทำซ้ำ 3 ครั้ง คำนวณตามสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ความหนาแน่นจำเพาะ (g/cm}^3\text{)} = \frac{W_3 \text{ (g)} \times D_s}{W_2 \text{ (g)} - W_4 \text{ (g)}}$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } D_s &= \text{ความหนาแน่นของทราย} \\ &= \frac{W_2 \text{ (g)} - W_1 \text{ (g)}}{V \text{ (cm}^3\text{)}} \end{aligned}$$

- 3) อัตราการขยายตัว ตามวิธีการในบทที่ 3

- 4) ความสามารถในการกักเก็บน้ำ (water holding capacity)

ตามวิธีการของ Lin และคณะ (2002) โดยนำตัวอย่างหนัก 15 กรัม (W_a) ใส่บีกเกอร์ไปแช่น้ำแล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำมาเทสิ่งบนตะแกรงเป็นเวลา 5 นาทีให้สะเด็ดน้ำ ชั่งน้ำหนัก (W_b) คำนวณค่าดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ความสามารถในการดูดซับน้ำ(\%)} = \frac{(W_b - W_a) \times 100}{W_a}$$

5) สี (color)

วัดสีของผลิตภัณฑ์แห่งที่ผ่านการบด ด้วยเครื่องวัดเทียบสี (CR-300 Chroma Meter, Minolta Camera, Japan) วิเคราะห์สีในระบบ CIE วัดค่า Y, x, y และทำการแปลงเป็นค่าในระบบ Hunter ได้ค่า L, a, b ทดสอบตัวอย่างชนิดละ 3 ซ้ำ

5.4 ผลการทดลองและการวิจารณ์

5.4.1 ผลของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มต่อพันธะเคมี

การวัดปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 5 ชนิดของทั้งเนื้อเทียม และวัตถุดิบที่มี FSF เป็นส่วนผสมในระดับ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังในตารางที่ 5.2 และ 5.3 จากการศึกษาชนิดพันธะเคมีที่เชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลโปรตีนในเนื้อเทียมที่เติม FSF พบว่าอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจน เป็นพันธะเคมีที่เกิดขึ้นโครงสร้างของโปรตีนในเนื้อเทียมมากกว่าพันธะไดซัลไฟด์ ซึ่งเห็นได้จากเนื้อเทียมที่เติม FSF ทุกระดับ มีปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ใน P+SDS, P+Urea และ P+S+U มีค่ามากกว่าปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ใน P+ME อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังตารางที่ 5.2 ซึ่งสอดคล้องกับผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์โปรตีนที่ละลายได้เพิ่มขึ้นระหว่าง P+S+U+M กับ P+ME และระหว่าง P+S+U+M กับ P+S+U เพื่อพิจารณาบทบาทของ SDS+Urea และ ME ของเนื้อเทียมทุกชนิด ดังตารางที่ 5.4 พบว่าปริมาณโปรตีนที่ละลายได้เมื่อเติม SDS+Urea ใน P+ME ของเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มในระดับ 0, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงกว่าของ ME ที่เติมใน P+S+U อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงว่าพันธะไฮโดรเจนและอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก มีบทบาทสนับสนุนการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลโปรตีนในโครงสร้างของเนื้อเทียมมากกว่าพันธะไดซัลไฟด์ อาจเป็นผลจากการที่โปรตีนถั่วเหลืองที่สูญเสียสภาพทางธรรมชาติ โครงสร้างโปรตีนเกิดการคลายตัว และเปิดส่วนที่เป็นไฮโดรโฟบิกภายในโมเลกุลออกมา (Hermansson, 1978) ซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลโปรตีนตรงส่วนที่เป็นไฮโดรโฟบิกกับโมเลกุลโปรตีนอื่นๆ และกับโมเลกุลไขมันได้ จึงอาจทำให้สัดส่วนของการเชื่อมโยงโครงสร้างระหว่างโมเลกุลโปรตีนด้วยพันธะไดซัลไฟด์ลดลง

ตารางที่ 5.2 ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ (กรัม/กรัม โปรตีน) ของเนื้อเยื่อที่มี FSF เป็นส่วนผสมในระดับ 0-50 เปอร์เซ็นต์ ในตัวทำละลาย 5 ชนิด

FSF content/Buffer	P ⁽¹⁾	P+S ⁽²⁾	P+U ⁽³⁾	P+M ⁽⁴⁾	P+S+U ⁽⁵⁾
0% FSF	0.090Y ⁽⁶⁾	0.282WX	0.347W	0.165wx ⁽⁷⁾ , XY	0.383W
10%FSF	0.091Y	0.266X	0.367W	0.174wx, Y	0.311W
20%FSF	0.087Y	0.245WX	0.288W	0.150wx, XY	0.324W
30%FSF	0.091Y	0.239XY	0.393W	0.196w, YZ	0.364WX
40%FSF	0.067Y	0.197X	0.359W	0.142x, XY	0.299W
50%FSF	0.062Z	0.212XY	0.369W	0.145x, YZ	0.312WX

(1) หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

(2) หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีโซเดียมโคเคซิลซัลเฟต

(3) หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มียูเรีย

(4) หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีเมอแคปโทเอธานอล

(5) หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มียูเรีย และ โซเดียมโคเคซิลซัลเฟต

(6) ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

(7) ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 5.3 ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ (กรัม/กรัม โปรตีน) ของวัตถุดิบที่มี FSF เป็นส่วนผสมในระดับ 0-50 เปอร์เซ็นต์ ในตัวทำละลาย 5 ชนิด

FSF content /Buffer	P	P+S	P+U	P+M	P+S+U
0% FSF	0.520a ⁽²⁾ , C ⁽¹⁾	0.837b, AB	0.734b, B	0.882a, A	0.900ab, A
10%FSF	0.522a, C	0.996a, A	0.737b, B	0.946a, A	0.963a, A
20%FSF	0.509a, C	0.981a, A	0.740b, B	0.939a, A	0.975a, A
30%FSF	0.309b, C	0.803b, A	0.489c, B	0.728b, A	0.792bc, A
40%FSF	0.340b, C	0.869ab, A	0.915a, A	0.951a, A	0.757cd, B
50%FSF	0.325b, C	0.728b, A	0.855a, A	0.722b, B	0.664d, B

(1) ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

(2) ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 5.4 เปอร์เซ็นต์โปรตีนที่ละลายได้เพิ่มขึ้นของเนื้อเทียมที่ FSF เป็นส่วนผสมในระดับ 0-50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเติม ME ใน P+S+U และเติม SDS+Urea ใน P+ME ตามลำดับ

Added Reagent	Full fat soy flour (%)					
	0	10	20	30	40	50
ME ⁽¹⁾	167b ⁽³⁾	224a	211b	176b	241b	222b
SDS+Urea ⁽²⁾	513a	482a	574a	413a	607a	597a

(1) หมายถึง เมอแคปโทเอธานอล

(2) หมายถึง โซเดียมโคเคซิลซัลเฟต และยูเรีย

(3) ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เมื่อศึกษาชนิดพันธะเคมีที่เชื่อมโยงภายในโมเลกุลโปรตีนของวัตถุดิบที่เติม FSF 0-50 เปอร์เซ็นต์ ประกอบด้วย พันธะไดซัลไฟด์ และอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก ซึ่งมีบทบาทมากกว่าพันธะไฮโดรเจน โดยพิจารณาจากปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ของวัตถุดิบที่มี FSF 0-40 เปอร์เซ็นต์ใน P+S และ P+ME มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) และมีค่ามากกว่าของ P+Urea ในวัตถุดิบที่มี FSF เป็นส่วนผสมในระดับ 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังตารางที่ 5.3 โดยบทบาทของพันธะเคมีที่พบในวัตถุดิบนี้แตกต่างไปจากบทบาทของพันธะเคมีที่พบในผลิตภัณฑ์ เนื่องจากพันธะไดซัลไฟด์ และอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก เป็นพันธะที่มีบทบาทมากในโมเลกุลโปรตีนของวัตถุดิบที่มีส่วนผสมของ FSF ส่วนเนื้อเทียมที่มีส่วนผสม FSF มีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลโปรตีนด้วยอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจน ที่มีบทบาทสำคัญต่อโครงสร้างของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม

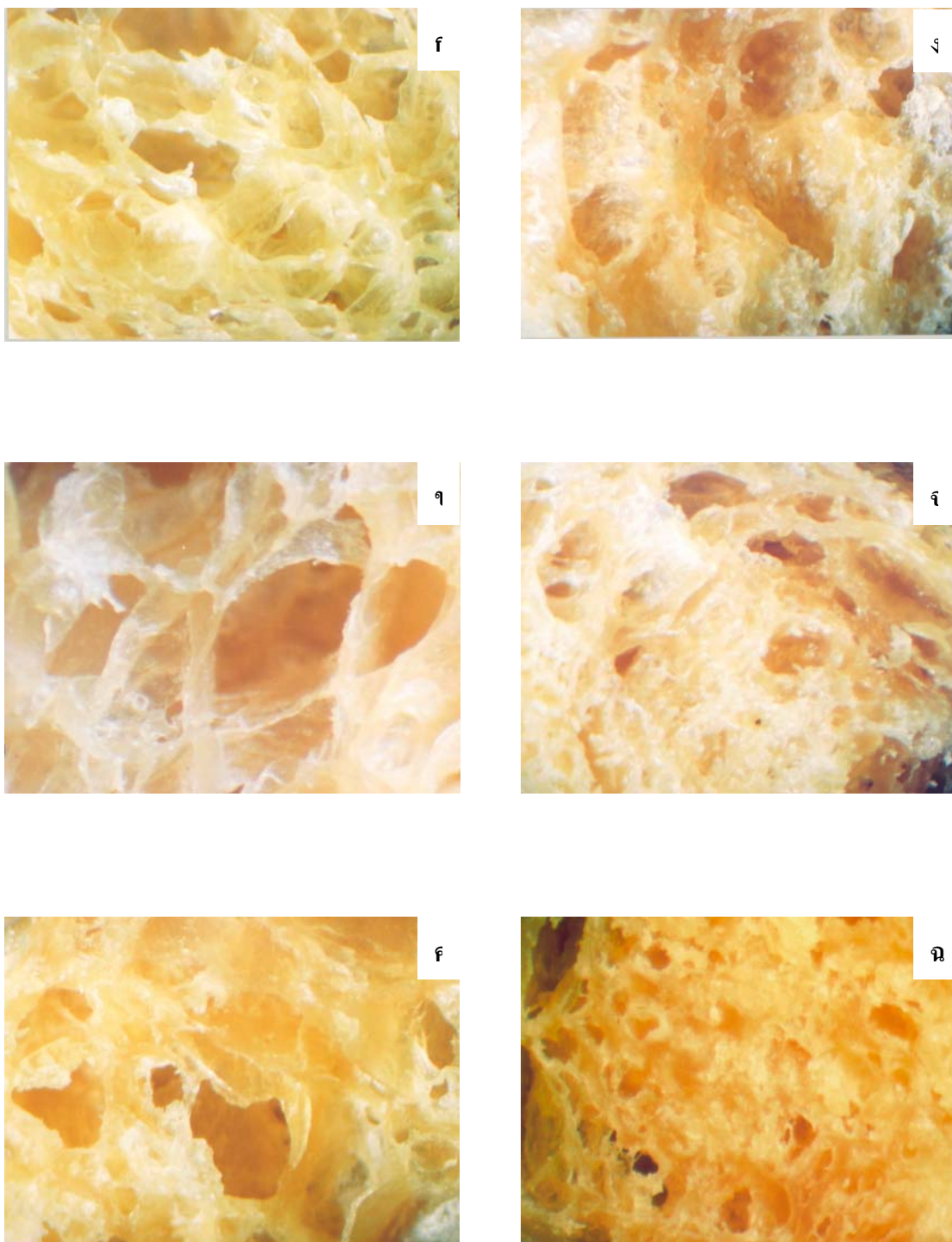
จากการศึกษาผลของปริมาณ FSF ต่อการสร้างพันธะเคมีของเนื้อเทียม ดังตารางที่ 5.2 พบว่าเมื่อปริมาณ FSF เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของพันธะไดซัลไฟด์ พันธะไฮโดรเจน และอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิกในโครงสร้างโปรตีนของเอกซทราเจต โดยเห็นได้จากเนื้อเทียมที่มีปริมาณ FSF เป็นส่วนผสมที่ระดับ 0 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ใน P+ME มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) ซึ่งพบผลเช่นเดียวกันนี้ในปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ P+S+U, P+SDS และ P+Urea ส่วนการเติม FSF ในวัตถุดิบเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ใน P+S+U มีค่าไม่แตกต่างกันทาง

สถิติ ($p > 0.05$) แต่เมื่อเพิ่ม FSF ถึงระดับ 50 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงว่าไขมันที่มีปริมาณสูงมากในวัตถุดิบ อาจไปเกิดอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิกกับโปรตีนได้มากขึ้น จึงมีผลรบกวนการสกัดโปรตีนของสารตัวทำละลาย ทำให้ปริมาณโปรตีนของวัตถุดิบที่เติม FSF สูงขึ้นมีค่าลดลง

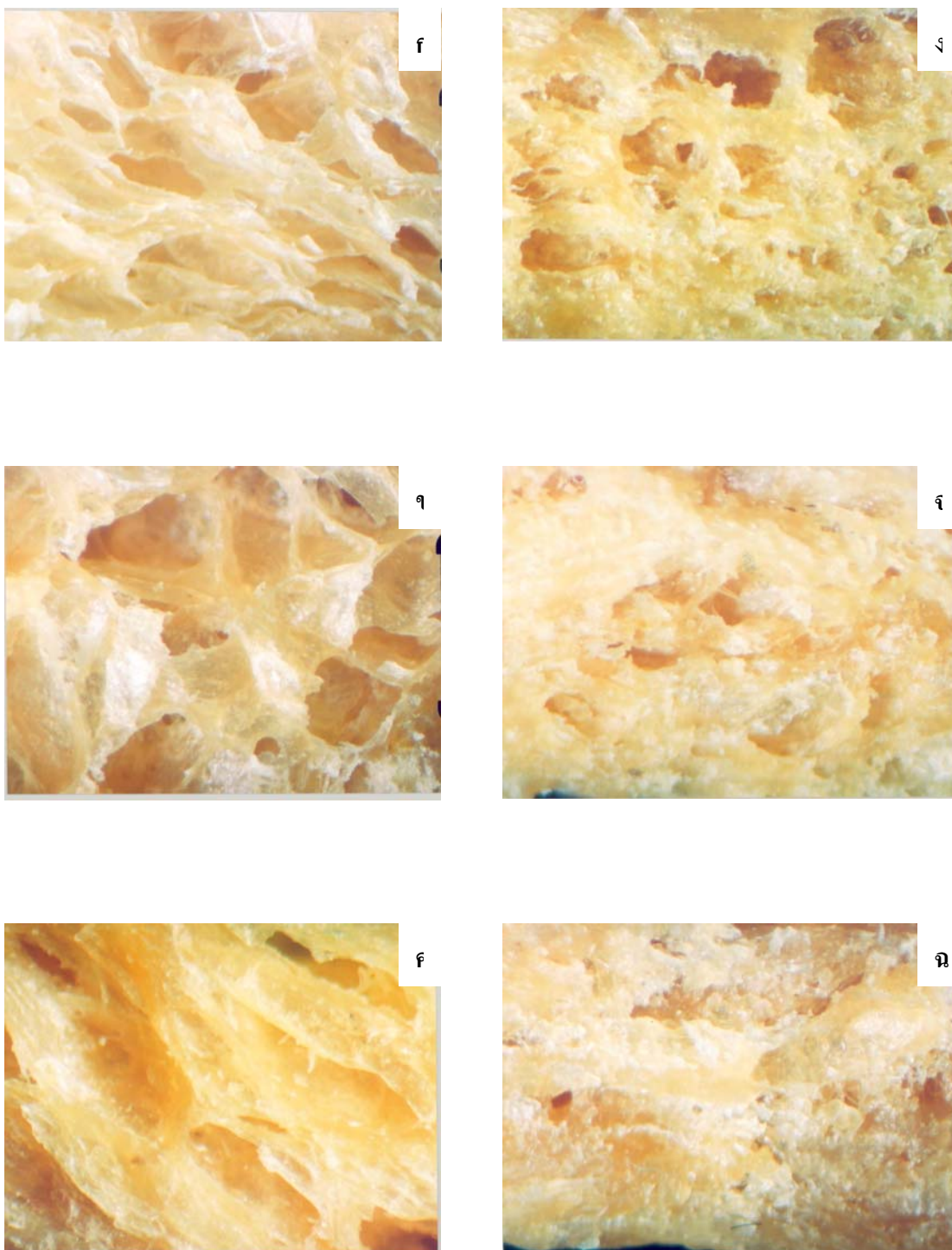
นอกจากนี้ยังพบว่ากระบวนการเอกซ์ทรูชัน มีผลทำให้การจัดเรียงตัวของโปรตีนในเนื้อเยื่อในรูปแบบใหม่ที่มีความซับซ้อนมากขึ้นกว่ารูปแบบเดิมที่พบในวัตถุดิบ (Smith, 1982) ดังสังเกตได้จากความสามารถในการละลายของโปรตีนในเอกซ์ทรูคเตลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ของวัตถุดิบ (Jeunink and Cheftel, 1979; Noguchi, Kugimiya, Haque, and Saio, 1981) ดังตารางที่ 5.2 และ 5.3 โดยพบว่าปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ของเนื้อเยื่อที่มีส่วนผสมของ FSF ระดับ 0-50 เปอร์เซ็นต์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ทุกชนิด มีค่าต่ำกว่าของวัตถุดิบที่มี FSF ส่วนผสมที่ระดับเดียวกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในบทที่ 3 และ 4 ข้างต้น

5.4.2 ผลของแป้งหัวเหลืองไขมันเต็มต่อลักษณะโครงสร้างและเนื้อสัมผัส

จากการตรวจสอบโครงสร้างภายในของเนื้อเยื่อที่เติม FSF ในระดับ 0-50 เปอร์เซ็นต์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ จากภาพที่ 5.1 ก-ค ซึ่งเป็นภาพถ่ายตามขวางที่ กำลังขยาย 12 เท่า ของเนื้อเยื่อที่มี FSF เป็นส่วนผสมในระดับต่ำ 0-20 เปอร์เซ็นต์ พบว่าเนื้อเยื่อมีช่องรูพรุนทั้งขนาดเล็กและใหญ่ ผนังของรูพรุนบาง มีริ้วเส้นใย นอกจากนี้ยังพบว่าเนื้อเยื่อมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างแบบเส้นใยยาวที่ดูโปร่งบาง ไม่เกาะเชื่อมตัวกันมากนัก ดังเห็นได้จากภาพที่ 5.2 ก-ค ซึ่งเป็นภาพถ่ายตามยาวที่ กำลังขยาย 30 เท่า ของเนื้อเยื่อที่มี FSF เป็นส่วนผสมในระดับต่ำ 0-20 เปอร์เซ็นต์ โดยโครงสร้างแบบเส้นใยดังกล่าวจัดเป็นโครงสร้างหลักของผลิตภัณฑ์เนื้อเยื่อที่เกิดจากการจัดเรียงตัวแบบโครงสร้างร่างแหของโปรตีนหัวเหลืองร่วมกับการเรียงตัวของสตาร์ชสาลี และโปรตีนสาลีที่มีโมเลกุลแบบโพลีเมอร์สายยาว เมื่อปริมาณ FSF เพิ่มขึ้นถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เนื้อเยื่อมีช่องรูพรุนที่มีขนาดเล็ก ผนังของช่องรูพรุนหนาขึ้นมาก และเกิดลักษณะที่เชื่อมเกาะตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ดังภาพที่ 5.1 ง-ฉ โดยไม่พบลักษณะการจัดเรียงตัวแบบเส้นใย แต่มีช่องรูพรุนขนาดเล็กในปริมาณน้อย เกิดลักษณะเนื้อสัมผัสที่เกาะตัวกันแบบแน่นทึบ ดังภาพที่ 5.2 ง-ฉ ไม่โปร่งบางเหมือนเนื้อเยื่อที่มีส่วนผสมของ FSF ในระดับต่ำกว่า ซึ่งอาจเป็นผลจากไขมันใน FSF ไปลดการจัดเรียงตัวแบบเส้นใยของเนื้อเยื่อ โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gwiazda และคณะ (1987) ซึ่งพบว่าโครงสร้างภายในของเอกซ์ทรูคเตด DSF ที่



ภาพที่ 5.1 ภาพถ่ายตามขวางที่กำลังขยาย 12 เท่าของเนื้อเทียมที่มี FSF เป็นส่วนผสมที่ระดับ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ (ก, ข, ค, ง, จ, ฉ)



ภาพที่ 5.2 ภาพถ่ายตามยาวที่กำลังขยาย 30 เท่าของเนื้อเทียมที่มี FSF เป็นส่วนผสมที่ระดับ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ (ก, ข, ค, ง, จ, ฉ)

เติมน้ำมันจากถั่วเหลือง 15เปอร์เซ็นต์ ที่ส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ปรากฏว่ามีหยดไขมันเล็กๆ ที่กระจายตัวไปตามโครงสร้างของโปรตีนและคาร์โบไฮเดรต จึงไปขัดขวางการจัดเรียงตัวแบบเส้นใยที่ดีของเอกซ์ทรูเดต และเมื่อทำเอกซ์ทรูชันของ FSF เดิมเพียงอย่างเดียว พบว่าเอกซ์ทรูเดตที่ได้ไม่มีโครงสร้างแบบเส้นใย เนื่องจากไขมันของ FSF ถูกบีบอัดกลายเป็นหยดน้ำมันที่แยกตัวออกจากวัตถุขีมาเคลือบผนังบารเรลไว้ ทำให้ความดันภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ต่ำ จึงผลักดันโคเนื้อเทียมให้ผ่านหัวแบบออกมาอย่างรวดเร็ว ทำให้การสร้างเนื้อสัมผัสไม่สมบูรณ์ ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการที่ไขมันไปรบกวนการรับน้ำเข้าสู่โครงสร้างของวัตถุดิบ ทำให้โคเนื้อเทียมมีความหนืดต่ำ ซึ่งสังเกตได้จากการที่ทอร์คและความดันที่หัวแบบของเนื้อเทียมมีส่วนผสมของ FSF ในปริมาณมากถึง 50 เปอร์เซ็นต์ มีค่าต่ำมาก ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.5 จึงทำให้เนื้อเทียมที่ได้มีการจัดเรียงตัวโครงสร้างภายในที่เป็นแบบเส้นใยน้อย

จากการตรวจสอบลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมที่เดิม FSF ในระดับต่างๆ ด้วยวิธี Quantitative Descriptive Analysis พบว่าเนื้อเทียมที่มีส่วนประกอบของ FSF ในปริมาณต่ำ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีปริมาณไขมันต่ำประมาณ 2.7-5 เปอร์เซ็นต์ สามารถเกิดลักษณะการจัดเรียงตัวแบบเส้นใยที่ดี ดังภาพที่ 5.2 ข และ ค จึงทำให้เนื้อเทียมมีลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางการฉีกได้และความเป็นเส้นใยสูง ซึ่งไม่แตกต่างจากเนื้อเทียมที่ไม่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม ดังแสดงในตารางที่ 5.5 แสดงว่าเนื้อเทียมที่มี FSF 0-20 เปอร์เซ็นต์ มีโครงสร้างภายในแบบเส้นใยคล้ายคลึงกัน จึงทำให้เนื้อเทียมทั้งสามชนิดนี้มีความเครียดใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นไปในทางเดียวกันกับ Cumming และคณะ (1972) ที่อ้างว่าการที่โปรตีนในเนื้อเทียมมีการจัดเรียงตัวเป็นเส้นใยที่ดี จำเป็นต้องใช้แรงที่ทำให้ผลิตภัณฑ์แตกหักมาก และสอดคล้องกับผลการทดลองของ Kearns และคณะ (1989) ที่พบว่าวัตถุที่มีปริมาณไขมัน 0.5-6 เปอร์เซ็นต์ สามารถนำมาแปรรูปเนื้อเทียมด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันได้ โดยอาจต้องปรับสภาพในการทำเอกซ์ทรูชันให้มีพลังงานในการเลื่อนเพิ่มขึ้น และใช้อุณหภูมิในการแปรรูปให้สูงขึ้น จากผลการทดลองในตารางที่ 5.5 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ FSF จาก 30 เป็น 50 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ลักษณะการฉีกได้และความเป็นเส้นใยของเนื้อเทียมลดลงมาก ($p < 0.05$) อาจเป็นผลจากการผสมวัตถุดิบที่มี FSF ในปริมาณมากขึ้นทำให้มีน้ำมันถั่วเหลืองประมาณ 7-10 เปอร์เซ็นต์ โดยแรงเลื่อนทำให้น้ำมันหลุดแยกออกมาจากส่วนผสม น้ำมันเป็นสารหล่อลื่นที่ไปลดแรงเสียดทาน และแรงทอร์คในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (Camier, 2000) เห็นได้จากการที่ค่าทอร์คและความดันที่หัวแบบของโคที่มีปริมาณ FSF ในระดับสูงมีค่าลดลงมาก ($p < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 5.5 จึงอาจทำให้ความดันไม่เพียงพอต่อการสร้างเนื้อสัมผัสแบบเส้นใยของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม (Cheftel et al., 1992; Lin, Huff, and Hsieh, 2000, 2002) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Singh และ

Smith (1998) ที่พบว่า การเติมน้ำมันจากจมูกข้าวสาลี (wheat germ oil) ในเอกซ์ทรูเดตสตาร์ช และเอกซ์ทรูเดตแป้งสาลี ทำให้ค่าทอร์คของการเอกซ์ทรูชันลดลง นอกจากนี้ อาจเป็นผลมาจากการที่ไขมันสามารถไปรบกวนการรับน้ำเข้าสู่โครงสร้างของโดเนื้อเทียมในระหว่างการผสม ทำให้การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขององค์ประกอบต่างๆ ของวัตถุดิบ ซึ่งนำไปสู่การสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมเป็นไปได้ยาก จึงทำให้เนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของ FSF ในปริมาณสูงมีเนื้อสัมผัสที่ไม่ดีนัก โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างการสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมกลุ่มนี้นั้น อาจเกี่ยวข้องกับ การที่ไขมันสามารถทำอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิกกับโปรตีนได้ จึงทำให้การจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างสายยาวแบบร่างแหสามมิติของโปรตีนถั่วเหลืองและการจัดเรียงตัวแบบสายยาวของโปรตีนสาลีเป็นไปได้ยาก และไขมันอาจไปเคลือบโมเลกุลของคาร์โบไฮเดรตไว้ ทำให้คาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำได้ไม่สามารถกระจายตัวไปตามส่วนต่างๆ ของโครงสร้างหลักของโดได้ รวมทั้งการที่ไขมันอาจไปลดการแตกแยกของเม็ดแป้งของสตาร์ชสาลี จึงทำให้มีโมเลกุลสตาร์ชที่สามารถไปจัดเรียงตัวควบคู่กับโมเลกุลสายยาวของโปรตีนถั่วเหลืองลดลง ทั้งหมดนี้อาจส่งผลให้โดมีความยืดหยุ่นลดลง เนื้อเทียมจึงไม่พองตัวเมื่อผ่านออกจากหัวแบบรวมทั้งเนื้อเทียมมีลักษณะทางด้านการฉีกได้และความเป็นเส้นใยลดลง จึงพบว่าเนื้อเทียมที่เติมแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มในปริมาณมากมีลักษณะเนื้อสัมผัสคล้ายของกึ่งแข็งกึ่งเหลวขึ้น ดังภาพที่ 5.2 ง-ฉ ข้างต้น ซึ่งเป็นไปในทางเดียวกับรายงานของ Guy (1994, 2001) ที่พบว่าเนื้อสัมผัสของเอกซ์ทรูเดตสตาร์ชที่มีส่วนผสมของน้ำมันเพิ่มขึ้น มีลักษณะคล้ายบิสกิต (biscuit-like texture) เนื่องจากไขมันไปเคลือบเม็ดแป้งไว้ ทำให้ลดการแตกแยกของโครงสร้างของเม็ดแป้ง จึงทำให้การกระจายตัวของโมเลกุลอะมิโลสและอะมิโลเพคตินที่เป็นโครงสร้างหลักของเอกซ์ทรูเดตลดลง ทำให้เอกซ์ทรูเดตไม่พองตัว

จากการตรวจสอบเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมที่มี FSF เป็นส่วนผสม ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ดังแสดงในตารางที่ 5.4 พบว่าปริมาณ FSF เพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 40 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เนื้อเทียมมีความเครียดไม่แตกต่างทางสถิติกับเนื้อเทียมที่ไม่มีส่วนผสมของ FSF โดยความเครียดนี้อาจบ่งบอกได้ถึงความแน่นแข็งของเนื้อสัมผัส แสดงว่าการเติม FSF เพิ่มขึ้นถึง 40 เปอร์เซ็นต์ ในเนื้อเทียมไม่ได้ทำให้ความแข็งของเนื้อเทียมลดลง ในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณ FSF ในเนื้อเทียมขึ้นถึง 50 เปอร์เซ็นต์ กลับทำให้เนื้อเทียมมีความเครียดเพิ่มขึ้น โดยเนื้อเทียมที่เติม FSF 50 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความเครียดสูงสุด ($p < 0.05$) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของ FSF 50 เปอร์เซ็นต์ มีโครงสร้างภายในที่เกาะตัวเป็นเนื้อเดียวกันแบบหนาแน่น ดังจะเห็นได้จากภาพที่ 5.1 ฉ และภาพที่ 5.2 ฉ จึงทำให้เนื้อเทียมมีอัตราการขยายตัวต่ำมาก ดังแสดงในตารางที่ 5.5 จึงทำให้เนื้อเทียมมีเนื้อสัมผัสที่แน่นแข็ง

ตารางที่ 5.5 ตัวแปรของกระบวนการเอกซ์ทรูชัน และลักษณะทางกายภาพของเนื้อเทียมที่มี FSF เป็นส่วนผสมในระดับ 0-50 เปอร์เซ็นต์

Extrusion parameters and Characteristics	Full fat soy flour (%)					
	0	10	20	30	40	50
Torque (%)	46.88a ⁽¹⁾	33.50b	29.13c	21.25d	18.38e	16.00e
Die pressure (psi)	428.75a	343.75b	227.50c	177.50d	156.25de	136.25e
Stress (g/cm ²)	2,233ab	1,978ab	1,648b	1,672b	1,896ab	2,457a
Textural appearance score						
- Tearing	7.89a	6.15ab	6.00abc	2.28bc	1.96bc	1.46c
- Fibrousness	7.17a	7.07a	6.59ab	4.30bc	4.03bc	2.59c

⁽¹⁾ ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอนหมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

5.4.3 ผลของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่

จากการวัดสมบัติทางกายภาพของเนื้อเทียมที่มี FSF เป็นส่วนผสมในระดับ 0-50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงข้อมูลในตารางที่ 5.6 พบว่าการเติม FSF ที่ระดับ 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เนื้อเทียมมีอัตราการขยายตัวไม่แตกต่างกันทางสถิติกับเนื้อเทียมที่ไม่ได้เติม FSF ($p > 0.05$) โดย Mohamed (1990) พบว่าวัตถุดิบที่มีไขมันเพิ่มขึ้นไม่เกิน 4 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เอกซ์ทรูเดตมีอัตราการขยายตัวสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Pan, Kong และ Chen (1992) ที่พบว่าการเอกซ์ทรูดแป้งข้าวทังเมล็ดที่มีส่วนผสมของน้ำมันถั่วเหลือง 3-4 เปอร์เซ็นต์ ทำให้อัตราการขยายตัวตามขวางของเอกซ์ทรูเดตเพิ่มขึ้น 2-4 เท่า ซึ่งอาจเป็นผลจากไขมันมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนให้กับโด ทำให้องค์ประกอบของโดได้รับความร้อนอย่างทั่วถึง นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากการเป็นสารหล่อลื่นของไขมันซึ่งทำให้สามารถดำเนินการแปรรูปได้อย่างสม่ำเสมอ จึงเกิดการสร้างเนื้อสัมผัสได้ดี โดย Guy (1994) พบว่าการเติมน้ำมันจากถั่วเหลือง ข้าวโพด และเมล็ดเรพ (rape seed) ในระดับ 0.5-1 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เนื้อเทียมมีการพองตัวมาก เนื่องจากโพลีเมอร์สตาร์ชเกิดการลื่นไหลได้ดีภายในบาริล ทำให้โดที่เกิดขึ้นไม่มีลักษณะคล้ายยางยืดเหนียวที่อาจไปยึดติดบาริลได้ จึงทำให้โดไม่เกิดการไหม้ติดบาริลขึ้น ส่งผลให้สามารถดำเนินการกระบวนการเอกซ์ทรูชันได้ตามปกติ ดังนั้นเนื้อเทียมที่มีแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเป็นส่วนผสม 0-20 เปอร์เซ็นต์ มีไขมันประมาณ 1-5 เปอร์เซ็นต์ อาจเป็นระดับที่ทำให้สามารถดำเนินการกระบวนการเอกซ์ทรูชันได้ตามปกติ เนื้อเทียมที่ได้มีเนื้อสัมผัสแข็งแรง มีอัตราการขยายตัวสูง จึงมีความสามารถในการกักเก็บน้ำสูงเพราะมีช่องรูพรุนในโครงสร้างเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ความหนา

แน่นจำเพาะของเนื้อเทียมต่ำ ($p < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 5.6 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bhattacharya และคณะ (1988) ที่พบว่าเอกซ์ทรูเดตที่มีปริมาณไขมันต่ำ มีอัตราการขยายตัวสูงกว่า เอกซ์ทรูเดตที่มีปริมาณไขมันสูง จึงทำให้เอกซ์ทรูเดตที่มีปริมาณไขมันต่ำนั้นมีความสามารถในการเก็บกักน้ำสูงกว่าตามไปด้วย แต่จากการทดลองแสดงให้เห็นให้ว่าเมื่อระดับ FSF ในเนื้อเทียมสูงกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้เนื้อเทียมมีอัตราการขยายตัวลดลงมาก ($p < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 5.6 Guy และ Horne (1988) กล่าวว่าอัตราการขยายตัวของผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเดตขึ้นอยู่กับสมบัติด้านความยืดหยุ่นขององค์ประกอบแต่ละชนิดในวัตถุดิบ ดังนั้นการที่เอกซ์ทรูเดตที่มีส่วนผสมของ FSF ในปริมาณมาก มีอัตราการขยายตัวลดลง แสดงว่าโครงสร้างของโคมมีความยืดหยุ่นลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากไขมันที่ไปลดการสร้างโครงสร้างหลักของโคม รวมทั้งลดการกระจายตัวของโปรตีนและสตาร์ชสาลี ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่เกิดการขยายตัวเมื่อออกสู่ภายนอกเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (Mohamed, 1990; Guy, 1994) เนื้อเทียมที่ได้เกิดลักษณะเนื้อสัมผัสที่เกาะตัวกันแน่นที่บิไม่เกิดโครงสร้างแบบเส้นใย มีช่องรูพรุนขนาดเล็กและไม่พองตัว จึงทำให้เนื้อเทียมที่มี FSF สูงจาก 30 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ มีความหนาแน่นจำเพาะเพิ่มขึ้น มีความสามารถในการกักเก็บน้ำลดลง ($p < 0.05$) (ตารางที่ 5.5) ซึ่งก็แสดงผลต่อลักษณะความแข็งแรงของเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมที่มีปริมาณ FSF สูงก็มีความเครียดสูงตามไปด้วย (ตารางที่ 5.4) โดยสอดคล้องกับผลการทดลองของ Hayter และคณะ (1986, 1987) ที่พบว่าความหนาแน่นจำเพาะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเครียด โดยเอกซ์ทรูเดตที่มีความหนาแน่นจำเพาะสูงมีโครงสร้างที่หนาแน่น ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความเครียดสูง

ตารางที่ 5.6 ลักษณะทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของเนื้อเทียมที่มี FSF เป็นส่วนผสมในระดับ 0-50 เปอร์เซ็นต์

Physical and Functional properties	Full fat soy flour (%)					
	0	10	20	30	40	50
Expansion ratio	2.38a ⁽¹⁾	2.53a	2.48a	1.90b	1.72bc	1.54c
Piece density (g/cm ³)	0.395bc	0.266cd	0.186d	0.283cd	0.498ab	0.602a
Water holding capacity (%)	281ab	307a	316a	280ab	261b	264b
Integrity index	0.82a	0.64ab	0.61b	0.48bc	0.33c	0.66ab
Color						
- L	74.26a	73.16ab	72.40abc	70.26cd	71.09bc	67.96d
- a	+3.81b	+4.44ab	+4.29b	+5.09a	+4.24b	+4.35ab
- b	+28.18d	+30.40c	+31.75c	+34.14b	+34.13b	+36.38a

⁽¹⁾ ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวนอนหมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการวัดดัชนีความสมบูรณ์ของโครงสร้างของเนื้อเทียมที่เติม FSF เพิ่มขึ้นจาก 0-40 เปอร์เซ็นต์ พบว่าดัชนีความสมบูรณ์ของโครงสร้างมีค่าลดลง ($p < 0.05$) แสดงว่าความสมบูรณ์ของการก่อตัวเป็นเนื้อเดียวกัน โครงสร้างเนื้อเทียมลดลง โดยอาจเป็นผลมาจากการที่เนื้อเทียม FSF เป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้น มีการจัดเรียงตัวแบบร่างแหเส้นใยที่สมบูรณ์น้อยลง ดังเห็นได้จากภาพที่ 5.1 ง, จ, และ ฉ และ ภาพที่ 5.2 ง, จ, และ ฉ ข้างต้น เนื่องจากไขมันมีส่วนไปลดการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของโปรตีนลง ทำให้โครงสร้างหลักที่เป็นเส้นใยของเนื้อเทียมไม่แข็งแรง (Guy, 1994) จึงเกิดการสูญเสียโครงสร้างของเนื้อเทียมอย่างง่ายคายเมื่อได้รับความร้อนและความดันสูง แต่เนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของ FSF 50 เปอร์เซ็นต์ มีดัชนีความสมบูรณ์ของโครงสร้างสูงไม่แตกต่างทางสถิติกับเนื้อเทียมที่มี FSF เป็นส่วนผสมในระดับ 0 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ($p > 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับการที่เนื้อเทียมที่มี FSF 50 เปอร์เซ็นต์ เป็นส่วนผสมมีเนื้อสัมผัสที่แข็งกว่าเนื้อเทียมชนิดอื่นๆ ส่งสังเกตได้จากค่าความเครียดของเนื้อเทียมดังตารางที่ 5.4 ซึ่งอาจเป็นเพราะเนื้อเทียมไม่พองตัว เนื้อสัมผัสเกาะตัวกันแน่น ทำให้น้ำไม่สามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างได้ จึงทำให้โครงสร้างของเนื้อเทียมไม่ถูกทำลายเมื่อได้รับความร้อนและความดันสูง

เมื่อวัดสีของเนื้อเทียมในระบบ L, a, b ด้วยเครื่องวัดสี พบว่าเมื่อปริมาณแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความสว่าง (L) ของเนื้อเทียมลดลงมาก ($p < 0.05$) และมีสีเหลือง (+b) มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Badrie และ Mellowes (1992) ที่พบว่าเมื่อเติมน้ำมันถั่วเหลืองเพิ่มขึ้นถึง 4 เปอร์เซ็นต์ ในแป้งมันสำปะหลัง ทำให้เอกซ์ทรูเดตมีสีเหลืองมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลจากการที่น้ำมันถั่วเหลืองได้รับความร้อน ออกซิเจน และน้ำในการผสม ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (นิธิยา รัตนานพนธ์, 2543) ส่งผลให้เนื้อเทียมที่มีแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มสูงมีสีเหลืองออกน้ำตาลคล้ำมากกว่าเนื้อเทียมชนิดอื่นๆ ส่วนสีแดง (+a) ของเนื้อเทียมที่เติมแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มที่ระดับต่างๆ มีค่าไม่แตกต่างทางสถิติกับเนื้อเทียมที่ไม่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม ($p > 0.05$)

5.5 สรุปผลการทดลอง

การใช้แป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มในวัตถุดิบสำหรับแปรรูปเนื้อเทียม พันธะเคมีที่สำคัญที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโครงสร้างโปรตีนในผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม คือ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก พันธะไฮโดรเจน และพันธะไดซัลไฟด์ การเติมแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเพิ่มขึ้นจาก 0 เปอร์เซ็นต์ เป็น 50 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณพันธะดังกล่าวในผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม เนื้อเทียมที่มีแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเป็นส่วนผสมในปริมาณ 0-20 เปอร์เซ็นต์ มีเนื้อสัมผัสที่แข็งแรง มีอัตราการขยายตัวสูง และมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างภายในแบบเส้นใยที่มีช่องรูพรุนตลอดโครงสร้าง จึงมี

ความสามารถในการกักเก็บน้ำสูง ในขณะที่เนื้อเทียมที่มีปริมาณแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเพิ่มขึ้นถึง 50 เปอร์เซ็นต์ มีเนื้อสัมผัสที่เกาะตัวกันแน่น มีจำนวนช่องรูพรุนน้อย เนื้อเทียมไม่พองตัว จึงทำให้มีความเครียด ดัชนีความสมบูรณ์ของโครงสร้าง และความหนาแน่นจำเพาะเพิ่มขึ้น โดยเนื้อเทียมไม่ปรากฏลักษณะการจัดเรียงตัวแบบเส้นใย จึงทำให้มีลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางการฉีกและความเป็นเส้นใยต่ำ และเนื้อเทียมที่ได้มีสีเหลืองคล้ำมาก ดังนั้นปริมาณแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีไขมันประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ จึงจัดเป็นปริมาณแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มสูงสุดที่ทำให้เนื้อเทียมมีลักษณะทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ที่ดี และสามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมของวัตถุดิบในการแปรรูปเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองได้

5.6 รายการอ้างอิง

- สมชาย ประภาวัต. (2532). ผลของความชื้นของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มและอุณหภูมิของเครื่องวัดเลอเทคเจอร์ไรเซอร์ต่อการทำเกษตรโปรตีน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพฯ (การประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 27. 30 มกราคม 2532. หน้า 363- 373.)
- Bhattacharya, M. and Hanna, M.A. (1988). Effect of lipid on the properties of extruded product. **J. Food Sci.** 53: 1230-1231.
- Bhattacharya, M., Hanna, M.A. and Kaufman, R.E. (1986). Textural properties of extruded plant protein blends. **J. Food Sci.** 51: 988-993.
- Camier, M.E. (2000). Chemical and nutritional changes in food during extrusion. In M.N. Raiaz (ed.), **Extruder in food applications**. Technomic Publication: Lancaster, Pennsylvania, USA.
- Charoenphol, C., Boonyasirikoon, P. and Suanpan, S. (n.d.). Formulation and acceptability of high protein and calcium extrudate snackfood from fish powder and full fat soy flour in proceedings: **World soybean research conference V. Technology utilization**. 431-436.
- Cheftel, J.C., Kitagawa, M. and Queguiner, C. (1992). New protein texturization process by extrusion cooking at high moisture level. **Food Rev. Internat.**

8: 235-242.

- Desrumaux, A., Bouvier, J. M. and Burri, J. (1999). Effect of free fatty acids addition on corn grits extrusion cooking. **Cereal Chem.** 76(5): 699-704.
- Faubion, J.M. and Hosney, R.C., (1982). High-temperature short-time extrusion cooking of wheat starch and flour. II Effect of protein and lipid on extrudate properties. **Cereal Chem.** 59(6): 533-537.
- Guy, R. C. E. (1994). Raw material for extrusion cooking processes. In N.D. Frame (ed.), **The technology of extrusion cooking**, pp. 52-72. American Association of Cereal Chemists: St. Paul, MN, USA.
- Gwiazada, S., Noguchi, A. and Saio, K. (1987). Microstructure studies of texturized vegetable protein products: effect of oil addition and transformation of raw materials in various sections of twin screw extruder. **Food Micro.** 6: 57-61.
- Harper, J.M. (1981). **Extrusion of foods**. Vol II. CRC Press: Boca Raton, Florida.
- Hayakawa, I. (1992). **Food processing by ultra high pressure twin screw extrusion**. Technomic Publishing: USA.
- Huang, T. Z., Bruechert, L.J., Rosen, R. T., Harman, T.G. and Ho, C-T.(1987). The effect of lipids and thermal generation of volatiles from commercial zien. **J of Agric. Food Sci.** 36(6): 985.
- Jeunink, J. and Cheftel, J.C. (1979). Chemical and physicochemical change in field bean and soybean protein texturized by extrusion. **J. Food Sci.** 44: 1322-1328.
- Kearns, J.P., Rokey, G.J. and Huber, G.R. (1989). Extrusion of texturized proteins. In T.H. Applewhite (ed.), **Proceedings of the world congress on vegetable**

protein utilization in human foods and animal feedstuffs. American Oil Chemistry Society: Champaign IL, USA.

- Lin, S., Huff, H.E., and Hsieh, F. (2000). Texture and chemical characteristics of soy protein meat analog extruded at high moisture. **J. of Agric. Food Chem.** 65(2): 264-269.
- Lin, S., Huff, H.E. and Hsieh, F. (2002). Extrusion process parameters, sensory characteristics, and structural properties of a high moisture soy protein meat analog. **J. Food Sci.** 67: 1066-1072.
- McCabe, E.M. (1991). **Method of producing simulated meat product from whole soybeans.** U.S. Patent. 5, 068, 117.
- Mustakas, G.C., Albrecht, W. J., Bookwalter, G.N., McGhee, J.E., Kwole W.F. and Griffin, E. L. (1970). Extruder processing to improve nutritional quality, flavour, and keeping quality of full fat soy flour. **Food Tech.** 24: 1290-1296.
- Noguchi, A., Kugimiya, W., Haque, Z., and Saio, K. (1981). Physical and chemical characteristics of extruded rice flour and rice flour fortified with soybean protein isolate. **J. of Food Sci.** 47: 240-245.
- Peribla, N. S., Cruz, M.P., De Belalcázar, F. and Diaz, G. J. (1997). Effect of temperature on wet extrusion on the nutritional value of full-fat soybeans for broiler chickens. **British Poultry Sci.** 38: 412-416.
- Pilli, T.D., Severini, C., Baiano, A., Derossi, A., Anhalass, A. and Legrand, J. (2004). Effect of operating conditions on oil loss and properties of products obtained by co-rotating twin-screw extrusion of fatty meal: Preliminary study. **J. of Food Eng.** Article in press.

- Ryan, K.J., Homco-Ryan, C.L., Jenson, J., Robbins, K. L. Prestat, C. and Brewer, M.S. (2002). Lipid extraction process on texturized soy flour and wheat gluten protein-protein interactions in dough matrix. **Cereal Chem.** 79(3): 434-438.
- Salunkhe, D. K. and Kadam, S.S. (1989). **CRC Handbook of world food legumes: Nutritional chemistry, processing technology and utilization.** Vol. III. CRC Press: Florida, USA.
- Schweizer, T. F., Reimann, S., Solms, J. Elisson, A. C. and Asp, N.G. (1986). Influence of drum-drying and twin screw extrusion cooking on wheat carbohydrates. III. Effects of lipids on physical properties, degradation and complex formation of starch in wheat flour. **J. Cereal Sci.** 4: 249-260.

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

กระบวนการเอกซ์ทรูชันได้ทำลายพันธะเคมีภายในโมเลกุลโปรตีนของวัตถุดิบ แล้วจึงเกิดการเชื่อมโยงด้วยพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลโปรตีนขึ้นใหม่เมื่อมีการสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมขึ้นได้แก่ พันธะไดซัลไฟด์ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเป็นพันธะเคมีที่มีบทบาทสำคัญต่อโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ การเติมโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเพิ่มขึ้นจาก 20 เปอร์เซ็นต์ เป็น 80 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณพันธะดังกล่าวในผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม แต่มีผลทำให้เนื้อเทียมมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้น ปรากฏลักษณะโครงสร้างภายในแบบหลวมๆ ที่มีช่องรูพรุนขนาดใหญ่และไม่หนาแน่น จึงส่งผลให้ความเครียดของเนื้อเทียมลดลง และมีลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางด้านการฉีกได้และความเป็นเส้นใยของเนื้อเทียมลดลง ส่วนเนื้อเทียมที่มีปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดต่ำมีลักษณะการจัดเรียงตัวแบบเส้นใยยาวต่อเนื่อง ซึ่งปรากฏชั้นวงของช่องรูพรุนที่สม่ำเสมอ ดังนั้นปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ทำให้เนื้อเทียมเกิดลักษณะโครงสร้างแบบเส้นใยของที่มีความแข็งแรงคือ 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำโพแทสเซียมโบรเมท 0-180 มิลลิกรัม ต่อกิโลกรัม มาใช้ในการแปรรูปเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ไม่ได้ส่งผลให้โครงสร้างของโปรตีนเกิดการเชื่อมโยงด้วยพันธะไดซัลไฟด์เพิ่มขึ้น จึงไม่ได้ทำให้เนื้อสัมผัสของเนื้อเทียม รวมทั้งลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางด้านการฉีกได้และความเป็นเส้นใยดีขึ้น จึงไม่ควรนำโพแทสเซียมโบรเมทมาใช้ในการผลิตเนื้อเทียมด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

การนำแป้งสาลีมาเป็นส่วนผสมของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง ทำให้เนื้อเทียมมีอัตราการขยายตัวและลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางด้านการฉีกได้และความเป็นเส้นใยเพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้เนื้อเทียมที่มีส่วนผสมแป้งสาลี 20 เปอร์เซ็นต์ มีเนื้อสัมผัสที่แข็งแรงกว่าเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้งสาลี 40 เปอร์เซ็นต์ จึงถือว่าปริมาณแป้งสาลี 20 เปอร์เซ็นต์เป็นระดับที่เหมาะสมต่อการนำมาเป็นส่วนผสมในวัตถุดิบสำหรับแปรรูปเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง เมื่อศึกษาบทบาทของเดนสาลีและสตาร์ชสาลีที่มีต่อการสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองที่เติมแป้งสาลีสามารถอธิบายได้ว่าสตาร์ชสาลีมีส่วนช่วยปรับปรุงการสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง โดยทำให้เนื้อเทียมมีอัตราการขยายตัวที่ดี และมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างที่มีลักษณะแบบเส้นใยของเนื้อเทียมเด่นชัดขึ้น ส่วนกลูเตนสาลีไม่ได้มีส่วนช่วยปรับปรุงลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางด้านการฉีกได้และความเป็นเส้นใยของเนื้อเทียมให้ดีขึ้น แต่มีผลต่อ

ทางด้านความแข็งแรงของเนื้อเทียม

การใช้แปรงถั่วเหลืองไขมันเต็มในวัตถุดิบสำหรับแปรรูปเนื้อเทียม ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโครงสร้างโปรตีนในผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมด้วยอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก พันธะไฮโดรเจน และพันธะไดซัลไฟด์ การเติมแปรงถั่วเหลืองไขมันเต็มเพิ่มขึ้นจาก 0 เปอร์เซ็นต์ เป็น 50 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณพันธะดังกล่าวในผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม เนื้อเทียมที่มีแปรงถั่วเหลืองไขมันเต็มเป็นส่วนผสมในปริมาณ 0-20 เปอร์เซ็นต์ มีเนื้อสัมผัสที่แข็งแรง มีอัตราการขยายตัวสูง และมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างภายในแบบเส้นใยที่มีช่องรูพรุนตลอดโครงสร้าง จึงมีความสามารถในการกักเก็บน้ำสูง ในขณะที่เนื้อเทียมที่มีปริมาณแปรงถั่วเหลืองไขมันเต็มเพิ่มขึ้นถึง 50 เปอร์เซ็นต์ มีเนื้อสัมผัสที่เกาะตัวกันแน่น มีจำนวนช่องรูพรุนน้อย เนื้อเทียมไม่พองตัว จึงทำให้มีความเครียดดัชนีความสมบูรณ์ของโครงสร้าง และความหนาแน่นจำเพาะเพิ่มขึ้น โดยเนื้อเทียมไม่ปรากฏลักษณะการจัดเรียงตัวแบบเส้นใย จึงทำให้มีลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางการฉีกและความเป็นเส้นใยต่ำ และเนื้อเทียมที่ได้มีสีเหลืองคล้ำมาก ดังนั้นปริมาณแปรงถั่วเหลืองไขมันเต็ม 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีไขมันประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ จึงจัดเป็นปริมาณแปรงถั่วเหลืองไขมันเต็มสูงสุดที่ทำให้เนื้อเทียมมีลักษณะทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ที่ดี และสามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมของวัตถุดิบในการแปรรูปเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองได้

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบและเนื้อเทียม

1. ปริมาณความชื้น (AOAC, 1995)

วิธีการ

1. อบภาชนะอะลูมิเนียมสำหรับหาความชื้นในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 2-3 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบไปใส่ในตู้ดูดความชื้น รอจนกระทั่งอุณหภูมิของถ้วยลดลงถึงอุณหภูมิห้อง แล้วชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 1-3 กรัม ใส่ลงในถ้วยหาความชื้นที่ทราบน้ำหนักแน่นอนแล้ว
3. อบตัวอย่างในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 5-6 ชั่วโมง
4. เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วนำมาใส่ตู้ดูดความชื้น รอจนมีอุณหภูมิห้อง แล้วชั่งน้ำหนัก และคำนวณปริมาณความชื้นตามสูตรดังนี้

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{\text{ผลต่างของน้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100$$

2. ปริมาณเถ้า (AOAC, 1995)

วิธีการ

1. เผาถ้วยกระเบื้องเคลือบในเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง นำออกมาจากเตาเผาใส่ตู้ดูดความชื้น รอจนกระทั่งอุณหภูมิของถ้วยลดลงถึงอุณหภูมิห้อง แล้วชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอนแล้วชั่งน้ำหนัก
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 2 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้องเคลือบซึ่งทราบน้ำหนักที่แน่นอน เผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส นาน 2-3 ชม. นำมาใส่ตู้ดูดความชื้น รอจนมีอุณหภูมิห้อง แล้วชั่งน้ำหนัก
3. คำนวณปริมาณเถ้าตามสูตรดังนี้

$$\text{ปริมาณเถ้า (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100$$

3. ปริมาณโปรตีน (AOAC, 1995)

วิธีการ

1. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่แน่นอนประมาณ 0.5-1.0 กรัม ใส่ลงในขวดย่อยโปรตีน
2. เติมสารเร่งปฏิกิริยา (สารผสมระหว่างคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) และ โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) ในอัตราส่วน 1:10) จำนวน 5.0 กรัม
3. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4) ปริมาตร 15-20 มิลลิลิตร และใส่สารป้องกันการเกิดฟอง (anti-forming agent) 4-5 หยด
4. ย่อยตัวอย่างบนเตาย่อยที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส จนสารละลายใส ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
5. นำตัวอย่างไปกลั่นด้วยเครื่องกลั่นไนโตรเจน ซึ่งมีท่อสำหรับเติมสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นเข้ามาทำปฏิกิริยา โดยนำขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มล. ที่บรรจุกรดบอริกเข้มข้น 4 % ปริมาตร 25 มล. และน้ำกลั่น 5 มล. ซึ่งเติมอินดิเคเตอร์ไว้แล้ว ไปติดตั้งเข้ากับปลายท่อของอุปกรณ์สำหรับกลั่น กำหนดระยะเวลาสำหรับแต่ละขั้นตอนการกลั่น และดำเนินการกลั่น ประมาณ 10 นาที
6. ไทเทรตสารละลายที่กลั่นได้และตัวอย่างควบคุม (blank) ด้วยกรดเกลือที่มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล จนกระทั่งสีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วง
7. คำนวณปริมาณโปรตีนตามสมการดังนี้

$$\text{ปริมาณโปรตีน (\%)} = \frac{(A - B) N \times 1.4 \times F}{W}$$

- เมื่อ
- A = ปริมาณกรดที่ใช้ในการไทเทรตกับตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
 - B = ปริมาณกรดที่ใช้ในการไทเทรตกับตัวอย่างควบคุม (มิลลิลิตร)
 - N = ความเข้มข้นของกรด (นอร์มอล)
 - F = ค่าคงที่สำหรับโปรตีนถั่วเหลืองคือ 6.25
 - W = น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)

4. ปริมาณไขมัน (AOAC, 1995)

วิธีการ

1. อบกระบอกกลมอะลูมิเนียมสำหรับหาไขมัน และ หลอดกระดาษกลมใส่ตัวอย่างในตู้อบไฟฟ้า ทิ้งให้เย็นใน โถดูดความชื้นและชั่งน้ำหนักที่แน่นอน
2. เปิดเครื่องหาไขมันไว้เตรียมก่อนประมาณ 30 นาที
3. ชั่งตัวอย่างบนกระดาษกรอง ประมาณ 1- 2 กรัม แล้วห่อให้มิดชิด ใส่ลงในหลอดใส่ตัวอย่าง แล้วคลุมด้วยสำลี
4. เติมนีโตรเลียมอีเทอร์ลงในกระบอกกลม ประมาณ 50 มล.และนำหลอดใส่ตัวอย่างไปต่อเข้ากับเครื่องสกัดไขมัน
5. ตั้งโปรแกรมการทำงาน กำหนดเวลาในแต่ละขั้นตอน และ เปิดสวิทซ์ให้เครื่องทำงาน
6. เมื่อครบกำหนดเวลา นำหลอดใส่ตัวอย่าง กระบอกกลม และตัวอย่างไปอบ ที่ 80-90 องศาเซลเซียส จนแห้ง แล้วนำออกมาใส่ตู้ดูดความชื้นจนมีอุณหภูมิห้อง
7. ชั่งน้ำหนักกระบอกกลม แล้วคำนวณปริมาณไขมันตามสมการดังนี้

$$\text{ปริมาณไขมัน (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักไขมันหลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100$$

ภาคผนวก ข

การทดสอบลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียม

การทดสอบลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียม ด้วยวิธี Quantitative Descriptive Analysis เป็นการตรวจสอบลักษณะปรากฏที่เด่นชัดทางเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียม โดยได้นิยามศัพท์ที่เกี่ยวข้องไว้ดังนี้

การฉีกได้ (tearing) หมายถึง การฉีกเนื้อเทียมออกเป็นสองส่วนตามแนวยาว โดยเนื้อเทียมที่สามารถฉีกได้ยาวมากที่สุด มีคะแนนสูงสุด คือ 10 เนื้อเทียมที่ไม่สามารถฉีกออกจากกันตามแนวยาวได้ มีคะแนนเป็น 0

ความเป็นเส้นใย (fibrous) หมายถึง ลักษณะการจัดเรียงตัวภายในชั้นของเนื้อเทียมที่มีลักษณะของเส้นใยยาวต่อเนื่องร่วมกับริ้วเส้นใยเล็ก ๆ ระหว่างเส้นใยยาวที่เชื่อมโยงกันตลอดชิ้นเนื้อเทียม โดยเนื้อเทียมที่มีเส้นใยยาวมากและริ้วเส้นใยมาก มีคะแนนสูงสุด คือ 10 ส่วนเนื้อเทียมที่ไม่มีเส้นใยและไม่มีริ้วเส้นใย มีคะแนนต่ำสุด คือ 0

ในการทดสอบลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมได้ฝึกฝนผู้ทดสอบด้วยการให้ตัวอย่างที่มีลักษณะการฉีกได้และความเป็นเส้นใยที่แตกต่างกัน เมื่อผู้ทดสอบให้คะแนนกับตัวอย่างแล้วนำคะแนนที่ได้มาประเมินเป็นคะแนนของแต่ละลักษณะของเนื้อเทียม เพื่อให้ผู้ทดสอบเข้าใจและจดจำลักษณะที่ใช้ในการทดสอบให้ตรงกับระดับคะแนนที่กำหนดไว้ โดยมีตัวอย่างและระดับการให้คะแนน ดังตารางที่ 1ข.

ตารางที่ 1 ข. ระดับการให้คะแนนของตัวอย่างอาหารที่ใช้ในการฝึกฝนผู้ทดสอบ

ตัวอย่างอาหาร	การฉีกได้ (คะแนน)	ความเป็นเส้นใย (คะแนน)
1. เนื้อบริเวณอกไก่	10	10
2. เนื้อเทียมจากไก่ห้วน	9	9
3. เนื้อเทียมจากห้องตลาดชิ้นใหญ่	7	1
4. เนื้อเทียมจากห้องตลาดชิ้นเล็ก	6	8
5. เนื้อเทียมที่มีแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน 60 % และโปรตีนถั่วเหลืองสกัด 40 %	2	3
6. เนื้อเทียมที่มีแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน 40% และโปรตีนถั่วเหลืองสกัด 60 %	1	1

เมื่อผ่านการฝึกฝนแล้ว จึงทดสอบกับตัวอย่างเนื้อเทียมจริงด้วยการให้ผู้ทดสอบนึกตัวอย่าง
ที่ผ่านการคูดน้ำกลับคืน แล้วจึงให้คะแนนของแต่ละคุณลักษณะในแบบทดสอบข้างล่างต่อไปนี้

แบบสอบถามลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัส

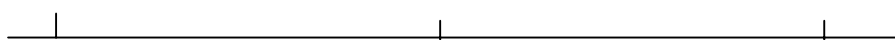
รหัสตัวอย่าง _____

ผู้ทดสอบ _____

วันที่ทดสอบ _____

กรุณาประเมิน โครงสร้างแบบเส้นใย และความสามารถในการฉีกของตัวอย่าง โดยเขียน
เส้นตัดกับเส้นคะแนนในแนวตั้งฉาก ตามความคิดเห็นของท่าน ขอขอบคุณ

1. โครงสร้างแบบเส้นใย

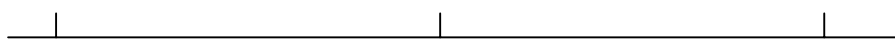


ไม่มี

มีปานกลาง

มีมากที่สุด

2. ความสามารถในการฉีก



ไม่สามารถฉีกได้

ฉีกได้ปานกลาง

ฉีกได้ตลอดความยาว

ประวัติผู้เขียน

ขจิรัตน์ วรรณรัมย์ เกิดเมื่อวันที่ 3 กันยายน พ.ศ. 2523 ที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เข้ารับการศึกษาในระดับประถมและมัธยมตอนต้นที่โรงเรียนราษฎร์บำรุงศิลป์ และจบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนอยุธยาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2540 ได้เข้ารับการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2544 ภายหลังได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2545