



**รายงานการวิจัย**

**การพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพจากข้าวเหลือง: เนื้อเห็ดม โยเกิร์ตถั่วเหลืองผง**

**ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**

**ผลงานวิจัยเป็นกรรมสิทธิ์ของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว**



รายงานการวิจัย

การพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพจากถั่วเหลือง: เนื้อเทียม โยเกิร์ตถั่วเหลืองผง

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุนันทา ทองทา

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุเวทย์ นิงสานนท์

รองศาสตราจารย์ ดร. กนกอร อินทราพิเชฐ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิรวัดน์ ยงสวัสดิกุล

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2546-2547

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ธันวาคม 2549

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ใช้งบประมาณทุนอุดหนุนวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2546 - 2547 ทำให้ผลงานวิจัยโครงการนี้เกิดขึ้นได้ ขอขอบคุณ ดร. จูติพร มะณีโกวา ที่ให้ความอนุเคราะห์ถั่วเหลืองพันธุ์ต่างๆ ขอขอบคุณบริษัทน้ำมันพืชไทย จำกัด (มหาชน) บริษัทอินดัสเตรียล เอ็นเตอร์ไพส์ จำกัด และบริษัทธนาคารผลิตภัณฑ์น้ำมันพืช จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์กากถั่วเหลือง และขอขอบคุณบริษัทวินแซนซ์ อินดัสตรีส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์โปรตีนถั่วเหลืองสกัด เพื่อใช้ในงานวิจัยการพัฒนาผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับอาคาร สถานที่ และเครื่องมือในการวิจัย และงานวิจัยนี้คงไม่สำเร็จหากขาดผู้ช่วยวิจัยเหล่านี้ คือ น.ส.จจิรัตน์ วรรณรัมย์ น.ส.สุรีย์พร บุญนา และ น.ส.แสงเดือน ศรีแก้ว จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

คณะผู้วิจัย

## บทคัดย่อ

การวิเคราะห์ไอโซฟลาโวนส์ในถั่วเหลืองสายพันธุ์ต่างๆ ที่สำคัญของไทย 9 พันธุ์ คือ สุโขทัย 1, สุโขทัย 2, นครสวรรค์ 1, เชียงใหม่ 2, เชียงใหม่ 60, สจ.1, สจ.2, สจ.4 และ สจ.5 พบว่าปริมาณสารไอโซฟลาโวนส์ทั้งหมดมีค่า 1,000 – 5,000  $\mu\text{g/g}$  โดยมีมากที่สุดในพันธุ์สุโขทัย 1 แต่มีต่ำสุดในพันธุ์ สจ.5 โดยชนิดที่พบส่วนใหญ่ คือ daidzin และ genistin ส่วนถั่วอื่นๆ เช่น ถั่วเขียว และ ถั่วแดงนั้น ตรวจไม่พบสารไอโซฟลาโวนส์

การใช้ไฮโดรคอลลอยด์ 9 ชนิด คือ pectin, carageenan, xanthan gum, locust bean gum (LBG), carageenan+LBG, xanthan gum+LBG, modified tapioca starch, modified corn starch และ modified rice starch โดยการสกัดน้ำมันถั่วเหลืองจากถั่วเหลืองซีกใช้อัตราส่วนของถั่วเหลืองต่อน้ำเท่ากับ 1:6 ให้มีปริมาณของแข็งในนมถั่วเหลืองเท่ากับ 8% แล้วเติม starter culture ที่มีเชื้อผสมระหว่าง *S. thermophilus* และ *L. delbrueckii subsp. bulgaricus* ปริมาณเริ่มต้น  $10^7$  cfu/ml ทำการบ่มที่อุณหภูมิ  $42^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ได้โยเกิร์ตที่เกิดเคิร์ดมี pH 4.6-4.8 ปริมาณกรด 0.6-0.7% โดยมี modified tapioca starch, modified rice starch, xanthan gum, xanthan gum+LBG ที่ผ่านการคัดเลือกช่วงแรก และเมื่อศึกษาปริมาณไฮโดรคอลลอยด์ทั้ง 4 ชนิดที่ผ่านการคัดเลือกดังกล่าว พบว่า 1% modified tapioca starch และ 1.5% modified rice starch เป็นชนิดและปริมาณที่ให้โยเกิร์ตถั่วเหลืองมีเนื้อสัมผัสเนียนละเอียด มีความแข็งที่วัดด้วย texture analyzer แบบ back extrusion ต่ำ คือ 900-4,000 g เกิด syneresis ต่ำ คือ 4-5%

การทำโยเกิร์ตถั่วเหลืองผงใช้การทำแห้งแบบพ่นฝอย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเข้าจาก  $110^{\circ}\text{C}$  เป็น  $120^{\circ}\text{C}$  ทำให้ปริมาณผลผลิตลดลงและมีสีแดงมากขึ้น แต่จำนวนจุลินทรีย์แลคติกและการละลายไม่ต่างกัน การพ่นฝอยโยเกิร์ตถั่วเหลืองที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 21% ให้จำนวนจุลินทรีย์แลคติกที่สูงคือ  $5.3-7.9 \times 10^8$  cfu/g และปริมาณผลผลิตที่สูงคือ 57-66% ค่าการละลายที่ปริมาณของแข็ง 14, 21 และ 28% มีค่า 77-82% การเก็บรักษาโยเกิร์ตถั่วเหลืองผงที่อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  และ  $45^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 28 สัปดาห์ และ 16 สัปดาห์ พบว่าโยเกิร์ตถั่วเหลืองผงมีค่า TBARS และ ค่าสี b-value เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา แต่ค่าดัชนีการละลายและปริมาณจุลินทรีย์ลดลง ส่วนค่า b-value ที่  $45^{\circ}\text{C}$  สูงกว่าที่  $25^{\circ}\text{C}$  แต่ค่า TBARS ที่  $25^{\circ}\text{C}$  สูงกว่าที่  $45^{\circ}\text{C}$  ส่วนปริมาณจุลินทรีย์ทั้งสองอุณหภูมิไม่แตกต่างกัน

การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกากถั่วเหลือง 7 ชนิด จากโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันถั่วเหลืองในประเทศไทย พบว่ากากถั่วเหลืองจากโรงงานสกัดน้ำมันทั้งหมดมีปริมาณโปรตีนสูง คือ 43-49% แต่มีความใส่น้อย และมีความสามารถในการละลายของไนโตรเจนต่ำเพียง 11-18%

การแปรรูปเนื้อเทียมด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ โดยผสมแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมันกับโปรตีนถั่วเหลืองสกัด 20, 40, 60 และ 80% จากการศึกษาปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ พบว่าพันธะไดซัลไฟด์ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจน มีบทบาทสำคัญในการเชื่อมโยงโครงสร้างของโปรตีนในผลิตภัณฑ์ การเพิ่มปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดทำให้อัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้น ความเครียด และลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสด้านการฉีกได้ และความเป็นเส้นใยลดลง การเติมโปรแทสเซียมโบรเมท 60, 120 และ 180 มก./กก. ในส่วนผสมที่มีโปรตีนถั่วเหลืองสกัด 20% ทำให้ปริมาณหมู่ซัลไฮดริล ความเครียด ลักษณะการฉีกได้และความเป็นเส้นใย และอัตราการขยายตัวไม่แตกต่างจากเนื้อเทียมที่ไม่ได้เติมโปรแทสเซียมโบรเมท การเติมแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม 0-20% ทำให้เนื้อเทียมมีลักษณะการฉีกได้ ความเป็นเส้นใย อัตราการขยายตัว และความสามารถในการกักเก็บน้ำไม่แตกต่างกัน แต่ความเครียดลดลง การเพิ่มแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเป็น 50% ทำให้เนื้อเทียมมีความเครียด และความหนาแน่นจำเพาะเพิ่มขึ้น ทำให้เนื้อเทียมมีความเป็นเส้นใยน้อย อัตราการขยายตัวและความสามารถในการกักเก็บน้ำลดลง

## Abstract

The nine important varieties of Thai soybeans, which were Sukhothai 1, Sukhothai 2, Nakornsawan 1, Chaingmai 2, Chaingmai 60, SJ 1, SJ 2, SJ 4 and SJ 5, were analyzed for isoflavones. The isoflavone contents of all soybean varieties were 1,000-5,000  $\mu\text{g/g}$ . The maximum content was found in Sukhothai 1 but the minimum was showed in SJ 1. The daidzein and genistin were the major isoflavones that were observed. The other beans, i.e. mungbean, redbean etc., were not observed for the isoflavones.

Nine hydrocolloids, which were pectin, carragenan, xanthan gum, locust bean gum (LBG), carragenan+LBG, xanthan gum+LBG, modified tapioca starch, modified corn starch and modified rice starch, were used in soy yogurt fabrication. The soy milk was prepared from water extraction with the ratio of splitted soy bean to water of 1:6. The total solid of soy milk was 8% before adding starter cultures, *S. thermophilus* and *L. delbrueckii subsp. bulgaricus*, of  $10^7$  cfu/g. After incubation at  $42^\circ\text{C}$  for 8 hours, the yogurt had the pH of 4.6-4.8 and 0.6-0.7% acidity. The modified tapioca starch, modified rice starch, xanthan gum and xanthan gum+LBG were screened from the first experiment. From a study on the amount of these hydrocolloids, soy yogurts with the addition of 1% modified tapioca starch and 1.5% modified rice starch exhibited smooth texture and low syneresis of 4-5%. Using Texture Analyzer, their hardness were also low, 900-4,000 g of back extrusion force.

Powdered soy yogurt was prepared by spray drying. An increase in inlet temperature from  $110$  to  $120^\circ\text{C}$  resulted in lower yield and more redness but their total lactic acid bacteria and solubility were similar. Spray drying of soy yogurt at 21% total solid maintained a high lactic acid bacteria count of  $5.3-7.9 \times 10^8$  cfu/g with a high yield of 57-66%. The solubility of powdered soy yogurt spray dried at 14, 21 and 28% total solid was the range of 77-82%. A storage test of powdered soy yogurt was conducted at the temperature of  $25^\circ\text{C}$  and  $45^\circ\text{C}$  for 28 and 16 weeks. After the storage were longer, TBARS and b-value increased, but solubility index and total lactic acid bacteria decreased. At  $45^\circ\text{C}$ , the b-value was higher, but TBARS was lower as compared to  $25^\circ\text{C}$ . However, total lactic acid bacteria of both temperatures were not different.

Physical and chemical properties of seven defatted soy meals from soybean oil extraction industries in Thailand were investigated. All defatted soy meals contained relatively high protein content, 43-49%. However, they were not clean and had low nitrogen solubility index, 11-18%.

Soy protein meat analog was produced using a twin screw extruder. Defatted soy flour was blended with soy protein isolated (SPI) of 20, 40, 60 and 80%. Based on protein solubility studies,

disulfide bond, hydrophobic interaction and hydrogen bond were the major linkages stabilizing meat analog structure. Increasing SPI increased expansion ratio, but decreased normal stress and texture appearance as judged on tearing and fibrous characteristics. The addition of 60, 120 and 180 mg/kg potassium bromate in the 20% SPI ingredient resulted that sulfhydryl group content, normal stress, expansion ratio and tearing and fibrous characteristics of meat analogs were not different from those without potassium bromate. Meat analog containing 10 and 20% full fat soy flour (FSF) showed tearing and fibrous characteristics, expansion ratio and water holding capacity similar to that without FSF but their stresses were lower. Increasing FSF to 50% resulted in high stress and bulk density, subsequently lowering in expansion ratio, water holding capacity, and fibrous structure.

สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| กิตติกรรมประกาศ  | ก    |
| บทคัดย่อภาษาไทย  | ข    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ   | ง    |
| สารบัญ   | ฉ    |
| สารบัญตาราง  | ช    |
| สารบัญภาพ  | ญ    |
| บทที่ 1 บทนำ   |      |
| ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย                                  | 1    |
| วัตถุประสงค์ของการวิจัย  | 3    |
| การวิจัยที่เกี่ยวข้องและคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่ทำ                  | 3    |
| บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย   |      |
| การวิเคราะห์หาสารไอโซฟลาโวนส์ในถั่วเหลืองและผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลือง | 17   |
| โยเกิร์ตถั่วเหลืองผง   | 19   |
| การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและเคมีของกากถั่วเหลืองจากโรงงาน          |      |
| สกัดน้ำมันและการพัฒนาผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากถั่วเหลือง              | 23   |
| บทที่ 3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล                                       |      |
| การวิเคราะห์หาสารไอโซฟลาโวนส์ในถั่วเหลืองและผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลือง | 33   |
| โยเกิร์ตถั่วเหลืองผง   | 37   |
| การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและเคมีของกากถั่วเหลืองจากโรงงาน          |      |
| สกัดน้ำมันและการพัฒนาผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากถั่วเหลือง              | 60   |
| บทที่ 4 บทสรุป   | 102  |
| บรรณานุกรม   | 105  |
| ประวัติผู้วิจัย  | 112  |



## สารบัญตาราง

|   | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 1 ปริมาณโปรตีนของวัตถุดิบที่มีส่วนผสมของ โปรตีนถั่วเหลืองสกัด 20, 40, 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์  | 24   |
| ตารางที่ 2 ปริมาณส่วนผสม และ โปรตีนทั้งหมดในวัตถุดิบ สำหรับการแปรรูปเนื้อเทียม ที่มีส่วนผสมของแป้งสาลี 0, 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์                     | 25   |
| ตารางที่ 3 ปริมาณส่วนผสม และ โปรตีนทั้งหมดในวัตถุดิบสำหรับแปรรูปของเนื้อเทียม ที่มีส่วนผสมของกลูเตนสาลี สตาร์ชสาลี และแป้งสาลี                      | 25   |
| ตารางที่ 4 ปริมาณส่วนผสม โปรตีน และไขมันในวัตถุดิบสำหรับแปรรูปเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ | 25   |
| ตารางที่ 5 ปริมาณ โปรตีนและไขมันของถั่วเหลืองสายพันธุ์ต่างๆ   | 33   |
| ตารางที่ 6 Retention time และ $R^2$ ของ standard isoflavone 4 ชนิด  | 33   |
| ตารางที่ 7 ความเข้มข้นและ % recovery ของ standard isoflavone 4 ชนิด   | 34   |
| ตารางที่ 8 ปริมาณสารไอโซฟลาโวนส์ ในถั่วชนิดต่างๆ  | 35   |
| ตารางที่ 9 ปริมาณสารไอโซฟลาโวนส์ในวัตถุดิบที่ใช้ทำเนื้อเทียม เนื้อเทียม และ โยเกิร์ตถั่วเหลืองผง  | 36   |
| ตารางที่ 10 องค์ประกอบทางเคมีของถั่วเหลืองเต็มเมล็ด (whole soybean) ถั่วเหลืองซีก (Split soybean) และ นมถั่วเหลือง (soymilk)                        | 37   |
| ตารางที่ 11 สมบัติของนมถั่วเหลืองที่เตรียมจากวิธี Spray drying และ Freeze drying  | 38   |
| ตารางที่ 12 ผลการเตรียมนมถั่วเหลืองผง โดยวิธี Spray drying  | 39   |
| ตารางที่ 13 ชนิดของไฮโดรคอลลอยด์ต่อ pH และความเป็นกรดของโยเกิร์ตถั่วเหลือง  | 40   |
| ตารางที่ 14 ลักษณะปรากฏและการแยกชั้นของของเหลวใน โยเกิร์ตถั่วเหลือง 8 %solid soymilk ที่ใช้ GDL และไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ                           | 41   |
| ตารางที่ 15 ปริมาณไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณลักษณะต่างๆ ของโยเกิร์ตถั่วเหลือง  | 46   |
| ตารางที่ 16 ลักษณะปรากฏของโยเกิร์ตถั่วเหลือง 8 % total solid soymilk ที่เติมไฮโดรคอลลอยด์ ปริมาณต่างๆ   | 47   |
| ตารางที่ 17 ปริมาณของแข็งทั้งหมดในนมถั่วเหลืองต่อคุณลักษณะต่างๆ ของโยเกิร์ตถั่วเหลือง   | 50   |
| ตารางที่ 18 ผลของการเติม glucose syrup ในนมถั่วเหลืองต่อคุณลักษณะต่างๆ ของ โยเกิร์ตถั่วเหลือง   | 50   |
| ตารางที่ 19 ลักษณะทางประสาทสัมผัสของโยเกิร์ตถั่วเหลือง  | 52   |
| ตารางที่ 20 ผลการทำโยเกิร์ตถั่วเหลืองผงที่สภาวะต่างๆ โดยวิธี spray drying   | 54   |

|   |    |
|---|----|
| ตารางที่ 21 ผลการวัดสีย้อมที่สกัดด้วยเครื่องฟุ้งที่สภาวะต่างๆ โดยวิธี spray drying  | 54 |
| ตารางที่ 22 องค์ประกอบทางเคมีของกากถั่วเหลือง (น้ำหนักแห้ง) ทั้ง 7 ชนิด   | 61 |
| ตารางที่ 23 สีของกากถั่วเหลืองทั้ง 7 ชนิด   | 64 |
| ตารางที่ 24 องค์ประกอบทางเคมีของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดทั้ง 5 ชนิด   | 66 |
| ตารางที่ 25 สมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดทั้ง 5 ชนิด   | 66 |
| ตารางที่ 26 ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ (กรัม/กรัม โปรตีน) ของเนื้อเทียมที่มีโปรตีนถั่วเหลืองสกัด 20-80 เปอร์เซ็นต์ ในตัวทำละลาย 7 ชนิด   | 68 |
| ตารางที่ 27 ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ (กรัม/กรัม โปรตีน) ของวัตถุดิบที่มีโปรตีนถั่วเหลืองสกัด 20-80 เปอร์เซ็นต์ ในตัวทำละลาย 7 ชนิด   | 68 |
| ตารางที่ 28 ตัวแปรของกระบวนการเอกซ์ทรูชันและลักษณะทางกายภาพของเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดในระดับ 20-80 เปอร์เซ็นต์  | 73 |
| ตารางที่ 29 ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ (กรัม/กรัม โปรตีน) ของวัตถุดิบและเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองที่เติมโพแทสเซียมโบรเมท 0, 60, 120 และ 180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในตัวทำละลาย 3 ชนิด | 75 |
| ตารางที่ 30 ปริมาณหมู่ซัลไฮดริล (ไมโครโมล/กรัม โปรตีน) ของวัตถุดิบและเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองที่ไม่เติมและเติมโพแทสเซียมโบรเมท 60, 120 และ 180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม              | 76 |
| ตารางที่ 31 ตัวแปรตามของกระบวนการแปรรูป และลักษณะทางกายภาพของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองที่เติมโพแทสเซียมโบรเมท 0, 60, 120 และ 180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม                             | 78 |
| ตารางที่ 32 ตัวแปรตามของกระบวนการแปรรูป ลักษณะทางกายภาพ และสมบัติเชิงหน้าที่ของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองที่เติมแป้งสาลี 0, 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์                                  | 80 |
| ตารางที่ 33 ตัวแปรตามของกระบวนการแปรรูป และลักษณะทางกายภาพของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองที่เติม โปรตีนกลูเตน สตาร์ชสาลี แป้งสาลี และส่วนผสมของกลูเตนและสตาร์ชสาลี                   | 81 |
| ตารางที่ 34 ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ (กรัม/กรัม โปรตีน) ของเนื้อเทียมที่มีแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเป็นส่วนผสมในระดับ 0-50 เปอร์เซ็นต์ ในตัวทำละลาย 5 ชนิด                               | 83 |
| ตารางที่ 35 ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ (กรัม/กรัม โปรตีน) ของวัตถุดิบที่มีแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเป็นส่วนผสมในระดับ 0-50 เปอร์เซ็นต์ ในตัวทำละลาย 5 ชนิด                                 | 84 |

- ตารางที่ 36 เปอร์เซ็นต์โปรตีนที่ละลายได้เพิ่มขึ้นของเนื้อเทียมที่มีแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม  
เป็นส่วนผสมในระดับ 0- 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเติมเมอแคปโทเอธานอลในบัพเฟอร์  
ที่มีโซเดียมโคเคซิลซัลเฟตและยูเรีย และเติมโซเดียมโคเคซิลซัลเฟตและยูเรียใน  
บัพเฟอร์ ที่มีเมอแคปโทเอธานอล ตามลำดับ 85
- ตารางที่ 37 ตัวแปรของกระบวนการเอกซ์ทรูชัน และลักษณะทางกายภาพของเนื้อเทียมที่มีแป้ง  
ถั่วเหลืองไขมันเต็มเป็นส่วนผสมในระดับ 0-50 เปอร์เซ็นต์ 89
- ตารางที่ 38 ลักษณะทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของเนื้อเทียมที่มีแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม  
เป็นส่วนผสมในระดับ 0- 50 เปอร์เซ็นต์ 92
- ตารางที่ 39 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรของการแปรรูปเอกซ์ทรูชันเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้ง  
ถั่วเหลืองไขมันเต็ม 20 เปอร์เซ็นต์ 94
- ตารางที่ 40 ค่าเฉลี่ยของสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของ  
แป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม 20 เปอร์เซ็นต์ 98

สารบัญภาพ

|  | หน้า |
|--|------|
| <b>รูปที่ 1</b> ลักษณะปรากฏของ โยเกิร์ตถั่วเหลืองที่เตรียมจากนมถั่วเหลืองปริมาณของแข็ง 8 %solid soymilk ที่ใช้ GDL และไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ   | 42   |
| <b>รูปที่ 2</b> การเปลี่ยนแปลง pH และ %Acidity ในระหว่างการหมักโยเกิร์ตถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 42±1°C โดยใช้นมถั่วเหลืองที่มีปริมาณของแข็ง 8% และไม่ใส่ไฮโดรคอลลอยด์   | 44   |
| <b>รูปที่ 3</b> การเจริญเติบโตของ <i>S. thermophilus</i> ระหว่างการหมักโยเกิร์ตถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 42±1°C โดยใช้นมถั่วเหลืองที่มีปริมาณของแข็ง 8% และไม่ใส่ไฮโดรคอลลอยด์   | 45   |
| <b>รูปที่ 4</b> การเจริญเติบโตของ <i>Lb. bulgaricus</i> ระหว่างการหมักโยเกิร์ตถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 42±1°C โดยใช้นมถั่วเหลืองที่มีปริมาณของแข็ง 8% และไม่ใส่ไฮโดรคอลลอยด์  | 45   |
| <b>รูปที่ 5</b> การเจริญเติบโตของ starter culture ระหว่างการหมักโยเกิร์ตถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 42±1°C โดยใช้นมถั่วเหลืองที่มีปริมาณของแข็ง 8% และไม่ใส่ไฮโดรคอลลอยด์  | 45   |
| <b>รูปที่ 6</b> ลักษณะปรากฏของ โยเกิร์ตถั่วเหลือง 8 % total solid soymilk ที่ใช้ commercial starter culture และเติมไฮโดรคอลลอยด์ปริมาณต่างๆ  | 48   |
| <b>รูปที่ 7</b> ลักษณะปรากฏของ โยเกิร์ตถั่วเหลืองที่เตรียมจากนมถั่วเหลืองปริมาณของแข็ง 8 % ที่ไม่เติมไฮโดรคอลลอยด์ เติม 1% modified tapioca starch และ 1.5% modified rice starch โยเกิร์ตถั่วเหลืองที่เตรียมจากนมถั่วเหลืองปริมาณของแข็ง 10 % ที่ไม่เติมไฮโดรคอลลอยด์ เติม 1% modified tapioca starch และ 1.5% modified rice starch โยเกิร์ตถั่วเหลืองที่เตรียมจากนมถั่วเหลืองปริมาณของแข็ง 12 % ที่ไม่เติมไฮโดรคอลลอยด์ เติม 1% modified tapioca starch และ 1.5% modified rice starch | 51   |
| <b>รูปที่ 8</b> การเปลี่ยนแปลงค่าสีเหลือง (b-value) ของ โยเกิร์ตถั่วเหลืองผงในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่างๆ  | 55   |
| <b>รูปที่ 9</b> การเปลี่ยนแปลงค่า TBARS ของโยเกิร์ตถั่วเหลืองผงในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่างๆ   | 56   |
| <b>รูปที่ 10</b> การเปลี่ยนแปลงจำนวนจุลินทรีย์ (a) <i>Lb. bulgaricus</i> และ (b) <i>S. thermophilus</i> ของโยเกิร์ตถั่วเหลืองผงในระหว่างการเก็บรักษา   | 58   |
| <b>รูปที่ 11</b> การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีการละลาย (Solubility Index) ของ โยเกิร์ตถั่วเหลืองผงในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่างๆ   | 59   |
| <b>รูปที่ 12</b> ลักษณะทางกายภาพของกากถั่วเหลืองทั้ง 7 ชนิด  | 62   |
| <b>รูปที่ 13</b> การกระจายตัวของกากถั่วเหลืองทั้ง 7 ชนิดที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ   | 63   |
| <b>รูปที่ 14</b> ดัชนีความสามารถในการละลายของโปรตีนของกากถั่วเหลืองทั้ง 7 ชนิด   | 65   |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| รูปที่ 15 | ภาพถ่ายตามขวาง ที่กำลังขยาย 17 เท่า ของเนื้อเยื่อที่เติมโปรตีนถั่วเหลืองสกัด 20, 40, 60 และ 80% ตามลำดับ                                     | 71  |
| รูปที่ 16 | ภาพถ่ายตามยาวที่ กำลังขยาย 120 เท่า ของเนื้อเยื่อที่เติม โปรตีนถั่วเหลืองสกัด 20, 40, 60 และ 80% ตามลำดับ                                    | 71  |
| รูปที่ 17 | ภาพถ่ายตามขวางที่ กำลังขยาย 12 เท่าของเนื้อเยื่อที่มีแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเป็นส่วนผสมที่ระดับ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์         | 87  |
| รูปที่ 18 | ภาพถ่ายตามยาวที่ กำลังขยาย 30 เท่าของเนื้อเยื่อที่มีแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเป็นส่วนผสมที่ระดับ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์          | 88  |
| รูปที่ 19 | พื้นที่ผิวตอบสนองของทอร์คที่สร้างระหว่างความชื้นวัตถุดิบและอุณหภูมิบารเลระหว่างความชื้นและความเร็วรอบสกรู และระหว่างความชื้นและอุณหภูมิบารเล | 95  |
| รูปที่ 20 | พื้นที่ผิวตอบสนองของอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่สร้างระหว่างความเร็วรอบและอุณหภูมิของบารเล  | 96  |
| รูปที่ 21 | ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอุณหภูมิของบารเล ความเร็วรอบของสกรู และความชื้น  | 97  |
| รูปที่ 22 | ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับอัตราการขยายตัวของเนื้อเยื่อ   | 99  |
| รูปที่ 23 | พื้นที่ผิวตอบสนองของความหนาแน่นที่สร้างระหว่างความชื้นและอุณหภูมิของบารเล  | 99  |
| รูปที่ 24 | พื้นที่ผิวตอบสนองของความสามารถในการกักเก็บน้ำที่สร้างระหว่างความชื้นและอุณหภูมิของบารเล  | 100 |
| รูปที่ 25 | ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความสมบูรณ์ของโครงสร้างกับความเร็วรอบของสกรู และความชื้นในการแปรรูป  | 101 |

## บทที่ 1

## บทนำ

### ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย และทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง (Reviewed literature)

เมล็ดพืชตระกูลถั่วจัดเป็นพืชที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบของเมล็ดสูง จัดเป็นแหล่งอาหารโปรตีนที่สำคัญอีกแหล่งหนึ่งที่นอกเหนือจากเนื้อสัตว์และราคาถูกกว่าเนื้อสัตว์ เป็นแหล่งโปรตีนที่บริโภคกันแพร่หลายในประเทศที่กำลังพัฒนา ในบรรดาถั่วชนิดต่างๆ ที่มีมากมายหลายชนิดในโลกนั้น ถั่วเหลืองนับว่าเป็นถั่วที่กำลังได้รับความสนใจมากในปัจจุบันเนื่องจากได้มีการรายงานออกมาอย่างแพร่หลายว่า การรับประทานถั่วเหลืองจะช่วยป้องกันโรคบางชนิดและส่งเสริมให้มีสุขภาพที่ดีขึ้น ดังที่ Zammer (1995) ได้จัดถั่วเหลืองเป็นพืชกลุ่มที่มีลำดับความสำคัญอันดับหนึ่งมีสารพวก phytochemicals ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการป้องกันมะเร็ง จึงกล่าวได้ว่าถั่วเหลืองจัดเป็นอาหารเพื่อสุขภาพ (functional foods) ซึ่งหมายถึงอาหารหรือส่วนประกอบของอาหารที่ให้ประโยชน์เพิ่มขึ้นต่อสุขภาพ นอกเหนือจากสารอาหารหลักตามที่ร่างกายต้องการ โดยให้ประโยชน์ทางด้านสรีรวิทยา หรือช่วยในการทำหน้าที่เฉพาะด้านต่อร่างกาย (Hasler, 1998) และปัจจุบันอาหารเพื่อสุขภาพกำลังได้รับความสนใจและให้ความสำคัญจากทั่วโลก

ถั่วเหลืองนอกจากจะมีปริมาณโปรตีนสูงและโปรตีนก็มีคุณภาพดีแล้ว ปัจจุบันเชื่อกันว่าถั่วเหลืองมีบทบาทในการป้องกันและรักษาโรคหลอดเลือดตีบตัน โรคมะเร็ง โรคกระดูกพรุน และช่วยบรรเทาอาการของหญิงหมดประจำเดือน (Hasler, 1998) ซึ่งผลของการรับประทานถั่วเหลืองต่อการลดคลอเลสเตอรอลในเลือดได้มีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย ดังที่มีในรายงานของ Carrol และ Kurowska (1995) Anderson et al.(1995) และ Cassidy et al.(1995) โดย Pottor (1998) ได้มุ่งประเด็นถึงการลดลงของคลอเลสเตอรอลนี้เป็นผลมาจาก isoflavones ในถั่วเหลือง Messina และ Bomes (1991) ได้รวบรวมรายงานต่างๆถึงบทบาทของถั่วเหลืองต่อการลดความเสี่ยงของการเกิดโรคมะเร็ง โดยสาร isoflavones ในถั่วเหลืองนี้จะมีโครงสร้างคล้ายคลึงกันกับ estrogenic steroids บางครั้งจึงเรียกว่า 'Phytoestrogen' โดยสารในกลุ่ม isoflavones ในถั่วเหลืองมีอยู่ 2 ชนิดหลัก คือ daidzein และ genistein สารพวก isoflavones จึงเป็นเอสโตรเจนอย่างอ่อน (weak estrogen) อาจทำหน้าที่แข่งขันกับเอสโตรเจนที่สร้างขึ้นโดยธรรมชาติในการจับกับตัวรับเอสโตรเจน จึงเกี่ยวข้องกับการลดความเสี่ยงของมะเร็งชนิดที่ขึ้นอยู่กับฮอร์โมนเอสโตรเจน (estrogen-dependent cancer) ส่วนผลของถั่วเหลืองต่อปริมาณและความหนาแน่นของกระดูกก็ได้ทำการศึกษาโดย Anderson และ Garner ในปี 1997 จะเห็นได้ว่า isoflavones เป็นสารที่มีความสำคัญต่อสุขภาพ Anderson and Wolf (1995) ได้สรุปว่าปริมาณสาร isoflavones ที่มีในถั่วเหลืองพันธุ์ต่างๆมีค่าระหว่าง 1200-4200 g/g ซึ่งปริมาณ isoflavones นี้ก็แปรปรวนขึ้นอยู่กับพันธุ์ ปีที่ปลูก และแหล่งที่ปลูก ดังนั้นควรมีการตรวจสอบปริมาณสาร isoflavones ในถั่วเหลืองพันธุ์ต่างๆที่ปลูกในประเทศไทยและถั่วอื่นๆที่ปลูกในประเทศไทย เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำมาใช้ประโยชน์

และอ้างอิงถึงคุณประโยชน์ทางด้านสรีรวิทยาของอาหารในกลุ่มพืชตระกูลถั่ว นอกจากนั้นยังจึงควรมีการส่งเสริมพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ถั่วเหลืองให้เป็นอาหารมากขึ้นดังที่ในประเทศตะวันตกกำลังส่งเสริมอยู่ในปัจจุบัน

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าถั่วเหลืองนั้นเป็นอาหารโปรตีนที่มีคุณประโยชน์มากมาย ในบรรดาอาหารที่ใช้ถั่วเหลืองเป็นวัตถุดิบหลักทั้งหมด ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม (TTP, Texture plant protein) เป็นส่วนประกอบหลักของการปรุงอาหารมังสวิรัตเพื่อใช้แทนเนื้อสัตว์ ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนั้นมีหลายระดับคุณภาพขึ้นอยู่กับลักษณะของตลาด การแปรรูปเนื้อเทียมจากพืชโปรตีนนั้นมีหลายวิธีการ เช่น fiber spinning, extrusion, steam texturization เป็นต้น การใช้กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันเป็นวิธีที่ค่อนข้างนิยมใช้ในการสร้างเนื้อสัมผัสของโปรตีนถั่วเหลืองให้มีลักษณะเป็นเส้นใยคล้ายคลึงกับเนื้อสัตว์ โดยวัตถุดิบที่ใช้ส่วนใหญ่คือ defatted soy flour ที่มีราคาถูกกว่า soy protein isolates โดย defatted soy flour นั้นควรมีปริมาณโปรตีนไม่น้อยกว่า 50% เยื่อใยไม่เกิน 3% และไขมันน้อยกว่า 1% และควรมีค่า NSI (Nitrogen Solubility Index) หรือ PDI (Protein Dispensability Index) ระหว่าง 50-70 (Haper, 1981) Sheard และคณะ (1984) ได้ศึกษาถึงบทบาทของคาร์โบไฮเดรตในแป้งถั่วเหลืองในการสร้างเนื้อสัมผัสของTPP พบว่า การใช้ defatted soy flour ที่มีค่า PDI เท่ากับ 20 มีปริมาณโปรตีน 50% ให้ลักษณะผลิตภัณฑ์โครงสร้างเป็นรูพรุนที่เป็นระเบียบมากกว่าการใช้ soy protein isolates อย่างเดียว อย่างไรก็ตามการใช้วัตถุดิบที่มีปริมาณโปรตีนน้อยจะมีผลทำให้ลดความเป็นเนื้อเดียวกันของเนื้อสัมผัสและการคูดน้ำเข้าไปในโครงสร้างน้อยลง (Kearns et al., 1989) จึงอาจสรุปได้ว่าปริมาณและคุณภาพโปรตีนมีบทบาทสำคัญในกระบวนการสร้างเนื้อสัมผัสของโปรตีนถั่วเหลืองด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน เพื่อให้เกิดเนื้อสัมผัสที่มีลักษณะเส้นใยคล้ายกับเนื้อสัตว์ (Stanley, 1989) สำหรับการศึกษาของความชื้นของวัตถุดิบ อุณหภูมิบารเรล ความเร็วรอบสกรูต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ได้มีการศึกษามากพอสมควร ดังที่มีในผลการวิจัยของ Cumming et al. (1972), Maurice and Stanley (1978), Holay and Harper (1982) และ Sam et al. (1998) เป็นต้น ส่วนการรายงานถึงการแปรรูปเนื้อเทียมด้วยแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มที่มีปริมาณไขมันสูงนั้นยังมีน้อยมาก เนื่องจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยส่วนใหญ่เป็นแบบสกรูเดี่ยว (single screw extruder) ทำให้ไม่สามารถสร้างเนื้อสัมผัสขึ้นมาได้ Gwiazda และคณะ (1987) ได้ศึกษาปัญหานี้ด้วยการใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ พบว่า ปริมาณไขมันที่มากกว่า 15% จึงจะมีผลต่อการป้องกันการจัดเรียงโครงสร้างเนื้อสัมผัสแบบเส้นใยในผลิตภัณฑ์ (extrudates) ดังนั้นการศึกษการใช้แป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเพื่อผลิต TPP จึงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจหากมีความเป็นไปได้ในการผลิต เพื่อเป็นการส่งเสริมการใช้ประโยชน์ของถั่วเหลืองที่ปลูกภายในประเทศที่มีปัญหาในเรื่องราคาที่ไม่แน่นอนและราคาตกต่ำในบางช่วง หากมีทางออกโดยมีการใช้ถั่วเหลืองในปริมาณที่สม่ำเสมอจากโรงงานอุตสาหกรรม ก็อาจทำให้ราคาของถั่วเหลืองภายในประเทศสูงขึ้นและคงที่ได้ นอกจากนี้การศึกษาคือความเป็นไปได้ในการใช้กากถั่วเหลืองที่เหลือใช้

จากโรงงานสกัดน้ำมันถั่วเหลืองมาเป็นวัตถุดิบในการแปรรูปเป็น TPP ก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะสร้างผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม นอกเหนือไปจากการนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์

นอกจากการทำ TTP แล้ว การใช้ประโยชน์ในรูปแบบที่เลียนแบบผลิตภัณฑ์นม เช่น โยเกิร์ตถั่วเหลือง และไอศกรีมโยเกิร์ต ก็เป็นที่ได้รับความสนใจ โดยเฉพาะกลุ่มผู้บริโภคที่เป็นมังสวิรัติและกลุ่มผู้บริโภคที่ไม่สามารถย่อยน้ำตาลแลคโตสในนม ทั้งนี้เพราะนอกจากได้คุณค่าทางสารอาหารจากส่วนของโปรตีน และ isoflavones แล้ว ยังได้รับประโยชน์จากจุลินทรีย์กลุ่ม Lactic acid bacteria ที่ใช้ในการผลิตโยเกิร์ตที่เปลี่ยนแลคโตสเป็นกรดแลคติก และอาจได้ผลดีต่อสุขภาพยิ่งขึ้นเมื่อใช้ *Bifidobacterium bifidus*, *B. longum*, *Lactobacillus acidophilus* และ *Lb. casei* ซึ่งมีคุณสมบัติในการเสริมสุขภาพ (probiotic) โดยเฉพาะระบบทางเดินอาหาร และบำรุงรักษาร่างกาย (therapeutic) (Vemam and Sutherland, 1994) อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ซึ่งใช้ถั่วเหลืองเป็นวัตถุดิบหลัก ยังมีลักษณะสมบัติที่ต้องปรับปรุงอีก เช่น ใช้โปรตีนนมเสริมโปรตีนถั่วเหลืองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการหมักและเพิ่มคุณภาพโดยรวมของโยเกิร์ต (Karleskind et al., 1991 และ Tuitemwong et al., 1996) การเติมสารประกอบประเภทไฮโดรคอลลอยด์เพื่อลดการแยกน้ำออกจากเจลโยเกิร์ต (Jang and Yoon, 1997)

#### วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาและตรวจสอบสาร isoflavones ในถั่วเหลืองพันธุ์ต่างๆ ที่ปลูกในประเทศไทย
2. เพื่อศึกษาและพัฒนาผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตถั่วเหลืองผง
3. เพื่อตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและเคมีของกากถั่วเหลืองในโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมัน เพื่อแนวทางของการใช้เป็นวัตถุดิบทำผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม
4. เพื่อศึกษาการใช้แป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มทีผลิตภายในประเทศเพื่อผลิตเป็นเนื้อเทียม

#### การวิจัยที่เกี่ยวข้อง และคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่ทำ

##### การวิเคราะห์หาสารไอโซฟลาโวนส์ในถั่วเหลืองและผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลือง

ไอโซฟลาโวนส์ (isoflavone) เป็นสารประกอบพวก polyphenolic ที่พบได้ในพืชทั่วไป โดยพบมากในถั่วเหลือง ไอโซฟลาโวนส์มีโครงสร้างทางเคมี 4 โครงสร้าง คือ aglycone ซึ่งประกอบด้วย daidzein, genistein และอนุพันธ์อื่นๆ  $\beta$ -glucoside ซึ่งประกอบด้วย daidzin, genistin และอนุพันธ์อื่นๆ acetyl-glucoside เช่น 6'-O-acetyl-glucoside และ malonylglucoside 6'-O-malonyl-glucoside เป็นต้น ไอโซฟลาโวนส์สามารถป้องกันโรคมะเร็งและเป็นประโยชน์ต่อสุขภาพในด้านการลดปริมาณคอเรสเตอรอลในเลือด ลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจและโรคกระดูกพรุน เนื่องจากเป็นสารในกลุ่ม phytoestrogen ซึ่งมีโครงสร้างและหน้าที่คล้ายคลึงกับฮอร์โมนเอสโตรเจน (Beck , Unterrieder , Krenn , Kubelka and Jungbauer , 2003 ; Brouns , 2002) แต่มีฤทธิ์น้อยกว่าเอสโตรเจนประมาณ 100-1,000 เท่า และด้วยความที่มีโครงสร้างและหน้าที่คล้ายคลึงกันจึงรบกวนการทำงานของฮอร์โมนเอสโต



รเจนได้ โดยแทรกตัวเข้าไปแทนที่ฮอร์โมนเอสโตรเจนซึ่งสามารถเปลี่ยนเซลล์ธรรมดาเป็นเซลล์มะเร็งได้ จึงช่วยลดการเจริญของเซลล์มะเร็ง ซึ่งมีรายงานว่าไอโซฟลาโวนส์ในรูปของ aglycone โดยเฉพาะ genistein แสดงความสามารถในการเป็น biological ได้ดีมาก (Messina et al.,1994; Anderson and Garner., 1997) นอกจากนี้ Peterson and Barnes (1991) และ Messina et al., (1994) รายงานว่าไอโซฟลาโวนส์ในรูปของ genistein ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีความสามารถในการยับยั้งการเจริญของเซลล์มะเร็งในมนุษย์ได้ ซึ่งไอโซฟลาโวนส์ในรูปของ glucoside จะมีการดูดซึมที่ลำไส้เล็กได้น้อยกว่า aglycone เนื่องจากมีมวลโมเลกุลขนาดใหญ่กว่า และมีหมู่ hydrophilic มากกว่า (Brown, 1998; Chang and Nair, 1995) ซึ่งสารที่มีความคล้ายคลึงกับฮอร์โมนเอสโตรเจนที่พบในพืชทั้งหมดนั้น ไอโซฟลาโวนส์ในถั่วเหลืองถูกนำมาศึกษามากที่สุด เนื่องจากมีการบริโภคถั่วเหลืองและผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองกันมาก ปริมาณการบริโภค soy isoflavone ในแถบประเทศเอเชียมีค่าอยู่ในช่วง 20-100 mg/day (Brouns , 2002) ซึ่งเป็นปริมาณที่มากกว่าประเทศในแถบยุโรปและอเมริกา (Fukutake et al.,1996) โดยในถั่วเหลืองและผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองมีปริมาณไอโซฟลาโวนส์อยู่ในช่วง 0.1-5 mg/g (Coward et al., 1993)

จากคุณประโยชน์ของสารไอโซฟลาโวนส์ดังที่กล่าวมา จึงได้มีการศึกษาวิธีการในการสกัดสารดังกล่าวออกมาจากถั่วเหลือง โดย Barnes et al. (1994) พบว่าสามารถสกัดสารไอโซ ฟลาโวนส์จากถั่วเหลืองได้โดยใช้ตัวทำละลายที่มีขั้วในสภาวะร้อน เช่น methanol หรือ acetonitrile

ในช่วงเวลาที่ผ่านมาได้มีการศึกษาหาปริมาณสารไอโซฟลาโวนส์ระหว่างถั่วเหลืองต่างสายพันธุ์ (Wang and Murphy , 1994a; Tuskamota et al.,1995; Carrão-Panizzi et al.,1998) และในผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองที่มีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันออกไป (Wang and Murphy; 1994; Coward et al., 1998) โดย Mercedes et al. (2002) ได้ศึกษาเวลาในการสกัดสารไอโซฟลาโวนส์ในแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม (full fat soy flour) ซึ่งพบว่าใช้เวลาเพียง 1 ชั่วโมงร่วมกับการคนกวนอยู่ตลอดเวลาที่อุณหภูมิห้องก็สามารถสกัดสารไอโซฟลาโวนส์ออกมาได้และมีปริมาณ daidzin และ genistin มากกว่า daidzein และ genistein ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Wang and Murphy (1994a,1994b) ที่พบว่าในแป้งถั่วเหลืองมีปริมาณ daidzin และ genistin มากกว่า dadzein และ genistein สำหรับ soy protein isolate นั้นมีปริมาณสารไอโซฟลาโวนส์ทั้งหมดประมาณ 600-1,000 µg/g ซึ่งน้อยกว่าในถั่วเหลืองและแป้งถั่วเหลือง ส่วน soy protein concentrate ที่ใช้สารละลายแอลกอฮอล์ในขั้นตอนการสกัดมีปริมาณสารไอโซฟลาโวนส์ทั้งหมดอยู่ในระดับต่ำ คือ 73 µg/g ซึ่งเป็นผลมาจากสารไอโซฟลาโวนส์ละลายได้สารละลายแอลกอฮอล์ จึงอาจสูญเสียไปในระหว่างกระบวนการผลิต นอกจากนี้ Young et al. (2004) ได้ศึกษาปริมาณสารไอโซฟลาโวนส์ในนมถั่วเหลืองหมักที่เวลาการหมักต่างๆ พบว่าสารไอโซฟลาโวนส์ส่วนใหญ่ที่พบเป็น daidzin และ genistin ส่วน dadzein และ genistein พบในปริมาณที่น้อยกว่า และจากผลการวิจัยของ Swanson et al. (2004) ซึ่งได้ทำการศึกษาปริมาณสารไอโซฟลาโวนส์ในถั่วเหลืองสายพันธุ์ต่างๆ พบว่าถั่วเหลืองแต่ละสายพันธุ์ มีปริมาณไอโซฟลาโวนส์แตกต่างกันออกไป

ขึ้นอยู่กับสภาวะและสภาพแวดล้อมในการปลูก นอกจากนี้ Hutabarat et al. (2001) ก็ได้ศึกษาปริมาณสารไอโซฟลาโวนส์ในถั่วเหลืองและผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองจากประเทศออสเตรเลียและอินโดนีเซีย โดยพบว่าถั่วเหลืองจากอินโดนีเซียมีปริมาณไอโซฟลาโวนส์มากกว่าออสเตรเลีย ซึ่งคาดว่ามาจากสภาวะและสภาพแวดล้อมในการปลูกเช่นเดียวกัน และมีความเชื่อกันว่าประโยชน์ของถั่วเหลืองต่อสุขภาพขึ้นอยู่กับความคงตัวของสารไอโซฟลาโวนส์ในระหว่างกระบวนการแปรรูป รวมถึงรูปแบบจำเพาะของอนุพันธ์ของไอโซฟลาโวนส์ในผลิตภัณฑ์ โดยรูปแบบหรือโครงสร้างของไอโซฟลาโวนส์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการแปรรูป (Wu, 1994; Kudou et al., 1991)

สำหรับประเทศไทยซึ่งถือได้ว่าเป็นประเทศเกษตรกรรม ที่มีการปลูกถั่วเหลืองกันอย่างกว้างขวาง ซึ่งถั่วเหลืองจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยชนิดหนึ่ง โดยถั่วเหลืองที่นิยมปลูกนั้นมีหลายสายพันธุ์ด้วยกัน เช่น พันธุ์นครสวรรค์ พันธุ์เชียงใหม่ 60 เป็นต้น ประกอบกับได้มีการนำถั่วเหลืองที่ปลูกภายในประเทศมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ มากมาย ได้แก่ ใช้ในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านการหมักและผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการหมัก เช่น นมถั่วเหลือง เต้าหู้อ่อน เต้าหู้แข็ง โปรตีนเกษตร เต้าเจี้ยว ซอสถั่วเหลือง และซีอิ๊วขาว เป็นต้น นอกจากนี้ยังนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์เสริมความงามต่างๆ เช่น สบู่ เครื่องสำอาง โลชัน ทาผิว แชมพูสระผม เป็นต้น ใช้ในทางอุตสาหกรรม เช่น ใช้ผลิตกาว ส่วนผสมยาฆ่าแมลง สี ปุ๋ย วิตามิน ยาต่าง ๆ กระดาษ ผ้า ฉนวนไฟฟ้า หมึกพิมพ์ เส้นใย เป็นต้น ซึ่งอาจเป็นส่วนสำคัญของผลิตภัณฑ์หรือเป็นส่วนช่วยให้มีคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ดีขึ้น นอกจากนี้ปัจจุบันประชาชนส่วนใหญ่มหันมาใส่ใจเกี่ยวกับสุขภาพกันมากขึ้น ดังนั้นถ้ามีการนำถั่วเหลืองสายพันธุ์ต่างๆ ในประเทศไทยมาวิเคราะห์หาปริมาณสารไอโซฟลาโวนส์ก็จะเป็นประโยชน์ในด้านการนำสร้างข้อมูลพื้นฐานด้านนี้ของถั่วเหลืองในประเทศ ซึ่งจะนำไปสู่การใช้ประโยชน์ต่อไป

### โยเกิร์ตถั่วเหลืองผง

โยเกิร์ต เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักนมด้วยแบคทีเรียที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย เช่น *Lactobacillus bulgaricus* และ *Streptococcus thermophilus* ซึ่งสามารถย่อยน้ำตาลในนมแล้วผลิตกรดแลคติก ทำให้โปรตีนตกตะกอนได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสกึ่งแข็งกึ่งเหลว มีกลิ่นหอมเฉพาะตัว มีรสชาติค่อนข้างเปรี้ยว และมีจุลินทรีย์ที่มีชีวิตอยู่ในปริมาณสูง โยเกิร์ตจึงเป็นอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เนื่องจากจุลินทรีย์ที่มีชีวิตอยู่หลังการหมักนี้จะช่วยปรับปรุงระบบภูมิคุ้มกันในร่างกาย ปรับสมดุลของจุลินทรีย์ในลำไส้ และกรดแลคติกยังมีประโยชน์ช่วยย่อยอาหาร ช่วยในการ ขับถ่าย และบำรุงผิวพรรณ นอกจากนี้จุลินทรีย์ *Lactobacillus bulgaricus* สามารถสร้างสาร hydroxy methylglutarate ที่มีคุณสมบัติยับยั้งการสังเคราะห์โคเลสเตอรอลในร่างกาย จึงทำให้ลดอัตราเสี่ยงต่อการเป็นโรคหัวใจที่เกิดจากระดับโคเลสเตอรอลสูงได้ (จารุวรรณ, 2543) และเนื่องจากโยเกิร์ตมีประโยชน์ต่อร่างกายในหลายๆด้าน จึงทำให้ความนิยมในการบริโภคโยเกิร์ตมีมากขึ้น รวมทั้งมีการ

พยายามศึกษาการนำวัตถุดิบอื่นที่มีคุณค่าทางโภชนาการมาผลิตเป็นโยเกิร์ตแทนการใช้ นำนมวัว เช่น นำนมถั่วเหลือง เพื่อเป็นการเพิ่มทางเลือกในการบริโภคโยเกิร์ตสำหรับผู้ที่มีแพ้ น้ำตาลแลคโตสในนมวัว (lactose intolerant) และผู้บริโภครวมมังสวิรัต

ถั่วเหลืองเป็นพืชที่มีโปรตีนสูงและมีคุณค่าทางโภชนาการใกล้เคียงกับโปรตีนจากเนื้อสัตว์ โปรตีนจากถั่วเหลืองช่วยลดการจับแคลเซียมออกมาในปัสสาวะ ช่วยป้องกันการเกิดโรคกระดูกพรุน และสามารถช่วยลดระดับโคเลสเตอรอลในเลือด ทำให้ลดโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจได้ นอกจากนี้ถั่วเหลืองยังมีองค์ประกอบพวกไอโซฟลาโวนส์ (isoflavone) ซึ่งมีคุณสมบัติในการเป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชัน (antioxidant) และช่วยป้องกันการเกิดภาวะหลอดเลือดแข็งตัว รวมทั้งมีผลเปลี่ยนแปลงเมตาบอลิซึมของฮอร์โมนเอสโตรเจน สามารถยับยั้งฤทธิ์ของฮอร์โมนเอสโตรเจนในการกระตุ้นการเจริญของเซลล์มะเร็ง และยับยั้งเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเจริญของเซลล์มะเร็ง (อรอนงค์, 2543) เนื่องจากประโยชน์ในด้านต่างๆของถั่วเหลืองเหล่านี้ ทำให้ปัจจุบันผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองมีหลากหลายและได้รับความนิยมมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในถั่วเหลืองยังมีองค์ประกอบพวกโอลิโกแซคคาไรด์ ได้แก่ raffinose และ stachyose ที่ร่างกายไม่สามารถย่อยได้ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดแก๊สในระบบทางเดินอาหาร (flatulence) ทำให้เกิดอาการท้องอืด ท้องเฟ้อ (Wang et al., 2003) นอกจากนี้ในถั่วเหลืองและผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองยังพบปัญหาในเรื่องของกลิ่นถั่ว (beany flavour) จากสารพวกอัลดีไฮด์ ได้แก่ hexanal และ pentanal ที่เกิดจากการออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัว (polyunsaturated fatty acid) ที่มีในถั่วเหลือง โดยมีเอนไซม์ lipoxygenase เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Tsangalis & Shah, 2004) ซึ่งปัญหาเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญในการจำกัดการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ถั่วเหลือง

โยเกิร์ตถั่วเหลืองเป็นการนำ นำนมถั่วเหลืองมาแปรรูปโดยใช้กระบวนการหมักของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งกระบวนการหมักนี้สามารถช่วยปรับปรุงคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสและลดคุณสมบัติขององค์ประกอบที่ไม่ต้องการของถั่วเหลืองได้ เช่น ช่วยลดการเกิด flatulence ของนมถั่วเหลือง เนื่องจากจุลินทรีย์จะสร้างเอนไซม์  $\alpha$  และ  $\beta$ -galactosidase ที่สามารถย่อยสลาย raffinose และ stachyose ให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (monosaccharide) ได้แก่ fructose, glucose และ galactose ที่ร่างกายสามารถย่อยได้ (Hou et al., 2000; Wang et al., 2003) และยังพบว่ากระบวนการหมักยังช่วยปรับปรุงคุณค่าทางโภชนาการของนมถั่วเหลือง โดยเพิ่มปริมาณวิตามินบี ได้แก่ riboflavin และ thiamine ในนมถั่วเหลือง (Hou et al., 2000)

Pongsawatmanit and Suklampoo (1996) ศึกษาการทำโยเกิร์ตจากนมถั่วเหลือง เพื่อหาวิธีการกำจัดกลิ่นถั่ว โดยใช้กระบวนการเตรียมนมถั่วเหลืองที่แตกต่างกัน พบว่าการเตรียมนมถั่วเหลือง โดยการแช่ถั่วเหลืองใน 0.5% NaHCO<sub>3</sub> และบดด้วยน้ำร้อนจะเกิดกลิ่นถั่วน้อยและได้ผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตที่มีการยอมรับทางประสาทสัมผัสที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าภายหลังกระบวนการหมักกิจกรรมของเอนไซม์ lipoxygenase ลดลง เนื่องจากจุลินทรีย์ที่ผลิตกรดแลคติกทำให้ pH ลดลงจึงไม่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ชนิดนี้ Buono และคณะ (1990) ได้ศึกษาการเตรียมโยเกิร์ตถั่วเหลืองที่มีการเติม

evaporated milk และสารละลาย 25% fructose แล้วเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆของโยเกิร์ตถั่วเหลืองที่ได้ พบว่าหลังการหมักโยเกิร์ตถั่วเหลืองมีปริมาณ stachyose ลดลง และการเติม fructose ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นเจลอ่อนคล้ายกับ stirred yoghurt ส่วนการเติม evaporated milk ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะความแข็งแรงของเจลคล้ายกับ set yoghurt ส่วน Cheng และคณะ (1990) ได้ศึกษาคุณสมบัติและการพัฒนาผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตจากนมถั่วเหลืองเรียกว่า sogurt ที่มีการเติม 0.15% แคลเซียมอะซิเตท (calcium acetate) 0.5%เจลาติน (gelatin) 2%แลคโตส และไม่เติมแลคโตส โดยการหมักใช้เชื้อ *Lactobacillus casei* และ *Streptococcus thermophilus* แล้วเปรียบเทียบกับโยเกิร์ตทั่วไป พบว่าโยเกิร์ตถั่วเหลืองมีรสชาติฝาดกว่าโยเกิร์ตโดยทั่วไป มีความเป็นเนื้อทราย (sandy) เล็กน้อย และเจลาตินมีผลต่อเนื้อสัมผัสของโยเกิร์ตถั่วเหลืองโดยทำให้เนื้อสัมผัสแน่น (firm) กว่าโยเกิร์ตโดยทั่วไป ส่วนการเติมแลคโตสช่วยให้โยเกิร์ตถั่วเหลืองมีค่าความเป็นกรดและรสชาติเปรี้ยวใกล้เคียงกับโยเกิร์ตโดยทั่วไป เนื่องจากการเติมแลคโตสช่วยให้จุลินทรีย์สามารถผลิตกรดได้มากขึ้น แต่การเติมแลคโตสในโยเกิร์ตถั่วเหลืองทำให้เนื้อสัมผัสมีความแน่นลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากเอนไซม์โปรไบโอติก (probiotic enzyme) จากยีสต์ที่สามารถตัด (break down) สายโพลีเปปไทด์ให้สั้นลง จึงส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของโปรตีนตกตะกอน

Lee และคณะ (1990) ศึกษาผลของ activated carbon ในการปรับปรุงกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตนมถั่วเหลือง และศึกษาผลของการเติม whey protein concentrate (WPC) และ non fat dry milk (NFDM) ในโยเกิร์ตนมถั่วเหลือง โดยพวกเขาพบว่า activated carbon ไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบฟีนอลิกและกลิ่นถั่วออกจากนมถั่วเหลือง เมื่อเปรียบเทียบโยเกิร์ตจากนมถั่วเหลืองกับโยเกิร์ตจากนม พบว่าโยเกิร์ตนมถั่วเหลืองมีปริมาณโปรตีนและค่าความหนืดสูงกว่า แต่มีปริมาณกรดแลคติกน้อยกว่าโยเกิร์ตจากนม เนื่องจากในนมมีปริมาณน้ำตาลแลคโตสสูงกว่านมถั่วเหลือง ทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยน้ำตาลแล้วผลิตกรดได้มากกว่า ส่วนการเติม WPC และ NFDM ในโยเกิร์ตนมถั่วเหลืองเพื่อปรับปริมาณแลคโตสให้ใกล้เคียงกับนมวัว พบว่าปริมาณกรดแลคติกที่ได้ไม่แตกต่างจากโยเกิร์ตนมถั่วเหลืองที่ไม่มีการเติม WPC และ NFDM ทั้งนี้เป็นผลมาจากอนุพันธ์ของน้ำตาลที่มีในถั่วเหลือง raffinose และ stachyose หรือองค์ประกอบอื่นๆที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตและการผลิตกรดของจุลินทรีย์

Trindade และคณะ (2001) ศึกษาผลของน้ำตาลซูโครสและระยะเวลาที่ใช้ในการหมักสำหรับการเตรียมโยเกิร์ตนมถั่วเหลือง โดยปริมาณน้ำตาลซูโครสที่ใช้ คือ 0%, 2% และ 2.5% ส่วนระยะเวลาที่ใช้ในการหมัก คือ 4-7 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสและคุณสมบัติต่างๆ พบว่าโยเกิร์ตนมถั่วเหลืองที่เติมน้ำตาลซูโครส 2% และใช้เวลาในการหมัก 6 ชั่วโมงมีคุณสมบัติที่ดีที่สุด

จากผลงานวิจัยข้างต้นจะเห็นว่าได้มีการศึกษาการพัฒนากระบวนการผลิตโยเกิร์ตถั่วเหลืองให้มีคุณสมบัติคล้ายกับโยเกิร์ตที่ทำจากนมวัวเพื่อให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค แต่โยเกิร์ตถั่วเหลืองยังมี

ข้อจำกัดในด้านของอายุการเก็บรักษา ดังนั้นหากมีการนำโยเกิร์ตถ้วยเหลวมาทำแห้งเป็นโยเกิร์ตถ้วยแข็งซึ่งยังมีจุลินทรีย์กลุ่มแลคติกที่มีชีวิตเหลืออยู่ก็เป็นแนวคิดหนึ่งในการพัฒนาผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตถ้วยแข็ง เพื่อให้มีอายุที่นานขึ้น และเป็นการเพิ่มความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์ถ้วยแข็งซึ่งยังคงคุณประโยชน์ทางด้านอาหารเพื่อสุขภาพที่ได้ทั้ง probiotic และคุณประโยชน์ของถ้วยแข็งอีกด้วย ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือเพื่อศึกษาการเจริญของเชื้อ *Lactobacillus bulgaricus* และ *Streptococcus thermophilus* ในน้ำนมถ้วยแข็ง เพื่อเลือกไฮโดรคอลลอยด์ที่เหมาะสมต่อการทำโยเกิร์ตถ้วยแข็ง เพื่อศึกษาสภาวะการทำแห้งแบบพ่นฝอยโยเกิร์ตถ้วยแข็งและคุณสมบัติของโยเกิร์ตถ้วยแข็ง และเพื่อหาอายุการเก็บของโยเกิร์ตถ้วยแข็ง

### การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและเคมีของกากถ้วยแข็งจากโรงงานสกัดน้ำมันและการพัฒนาผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากถ้วยแข็ง

ปัจจุบันผลิตภัณฑ์อาหารจากถ้วยแข็งได้รับความนิยมจากกลุ่มผู้บริโภคเป็นอย่างมาก เนื่องจากถ้วยแข็งเป็นแหล่งของโปรตีนที่มีราคาถูกและหาซื้อได้ง่าย มีสารอาหารที่ให้ประโยชน์ต่อร่างกายหลายชนิด ได้แก่ กรดไขมันที่จำเป็นต่อร่างกาย (essential fatty acids) ใยอาหาร (dietary fiber) และสารในกลุ่มพฤกษเคมี (phytochemical compounds) เป็นต้น (อาณัติ นิติธรรมยง และ ประไพศรี สิริจักรวาล, 2543) ส่งผลให้มีการแปรรูปถ้วยแข็งมาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด ได้แก่ ซอสชีอิ้ว นำนมถ้วยแข็ง และเต้าหู้ เป็นต้น โดยผลิตภัณฑ์อาหารเหล่านี้สามารถนำไปบริโภคได้ทันที นำนมถ้วยแข็งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมในการประกอบการปรุงอาหารอย่างมากในประเทศไทย ปัจจุบันมีโรงงานสกัดน้ำมันกากถ้วยแข็ง 11 โรงงานทั่วประเทศ โดยถ้วยแข็งที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตส่วนใหญ่นำเข้ามาจากต่างประเทศ กากถ้วยแข็งที่เหลือจากการสกัดน้ำมันนั้นถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ (อภิพรรณ พุกภักดี, 2546) ซึ่งจะต้องมีการควบคุมคุณภาพของกากถ้วยแข็งให้เหมาะสม เนื่องจากสมบัติของกากถ้วยแข็งนั้นมีผลต่อการเจริญเติบโตของสัตว์เลี้ยงและมนุษย์ โดยทั่วไปแล้วกากถ้วยแข็งควรมีโปรตีน 44-48 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 0.9-1.0 เปอร์เซ็นต์ เยื่อใยหยาบ 7.0 เปอร์เซ็นต์ และเถ้า 6.0 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้การให้ความร้อนในขั้นตอนการแปรรูปนั้นจะต้องอยู่ในระดับที่เหมาะสมที่สามารถลดระดับของทริปซินอินฮิบิเตอร์ที่พบมากในถ้วยแข็งลงได้ ซึ่งจะช่วยให้สัตว์สามารถย่อยอาหารได้ และนำอาหารไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่ ทำให้สัตว์สามารถเจริญเติบโตได้เป็นปกติ ส่วนกากถ้วยแข็งที่ได้รับความร้อนมากเกินไป จะมีสีน้ำตาลไหม้ ทำให้คุณภาพของโปรตีนลดลง ทำให้การย่อยได้ของไลซีนลดลง ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในเป็นอาหารสัตว์ แต่ในกรณีที่ต้องการนำกากถ้วยแข็งมาแปรรูปเป็นเนื้อเทียมเพื่อใช้เป็นอาหารมนุษย์ ในช่วงการให้ความร้อนแบบย่าง (toasting) ถ้วยแข็งในกระบวนการสกัดน้ำมันถ้วยแข็งนั้น ต้องทำที่อุณหภูมิต่ำในสภาวะลดความดันเพื่อรักษาคุณภาพของโปรตีนถ้วยแข็งไว้ เนื่องจากมีความสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งสามารถวัดคุณภาพของโปรตีนได้โดยใช้ดัชนีความสามารถในการละลายของ

ไนโตรเจน (nitrogen solubility index: NSI) โดยโปรตีนที่ได้รับความร้อนสูงในการแปรรูปมี NSI 10-20 เปอร์เซ็นต์ โปรตีนที่ได้รับความร้อนปานกลางมี NSI 20-40 เปอร์เซ็นต์ และโปรตีนที่ได้รับความร้อนน้อยมี NSI 85-90 เปอร์เซ็นต์ (ประเสริฐ สายสิทธิ์ และคณะ, 2527) งานวิจัยนี้จึงทำการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและเคมีของกากถั่วเหลืองจากโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันภายในประเทศ โดยรวบรวมเป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อตรวจสอบแนวทางของการพัฒนาการใช้กากถั่วเหลืองเป็นวัตถุดิบในการทำผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม

แป้งถั่วเหลืองสามารถนำไปเป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ เช่น ผลิตภัณฑ์เนื้อ นม พาสตา เบเกอรี่ เครื่องดื่ม และผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม เป็นต้น แป้งถั่วเหลืองมีหลายประเภทได้แก่ แป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม (full fat soy flour) แป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน (defatted soy flour) โปรตีนถั่วเหลืองเข้มข้น (soy protein concentrate) และโปรตีนถั่วเหลืองสกัด (soy protein isolate) เป็นต้น โดยแป้งถั่วเหลืองส่วนใหญ่ได้นำเข้ามาจากต่างประเทศ มีเพียงแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเท่านั้นที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศไทย เนื่องจากกรรมวิธีการแปรรูปแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มมีขั้นตอนง่ายไม่ซับซ้อนสามารถทำเป็นอุตสาหกรรมในครัวเรือนและชุมชนได้ โดยการให้ความร้อนแก่เมล็ดถั่วเหลือง แล้วนำไปปดและร่อน จนได้แป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มที่มีไขมันมากถึงร้อยละ 20 ซึ่งประกอบด้วยกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัว และไม่มีคลอโรสเตอรอล ทั้งยังมีสมบัติเชิงหน้าที่ที่ดี จึงมีการใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อาหารพวกเบเกอรี่และเครื่องดื่มต่างๆ (ประเสริฐ สายสิทธิ์ และคณะ, 2527; Tanteeratarom, 1993)

เนื้อเทียม เป็นผลิตภัณฑ์อาหารจากพืชโดยเฉพาะถั่วเหลืองที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้ในการบริโภคทดแทนเนื้อสัตว์ ซึ่งได้รับความนิยมจากกลุ่มผู้บริโภคมังสวิรัติและกลุ่มผู้บริโภคทั่วไป และจำเป็นสำหรับการพัฒนาเพื่อเพิ่มปริมาณอาหารให้เพียงพอับประชากรโลกที่เพิ่มขึ้น ทั้งในกลุ่มประเทศกำลังพัฒนาและด้อยพัฒนา ซึ่งเป็นกลุ่มประเทศที่ประชากรส่วนใหญ่มีฐานะยากจน (เศรษฐศิลป์ อัมวรรณ และ กัทธาภรณ์ ศรีสมรรถการ, 2541; อภิพรรณ พุกภักดี, 2546) ถั่วเหลืองจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีพื้นที่การเพาะปลูกทั่วโลก เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันพืช อาหาร และการเลี้ยงสัตว์ โดยสหรัฐอเมริกาเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกถั่วเหลืองเป็นรายใหญ่ของโลก ส่วนปริมาณผลผลิตถั่วเหลืองภายในประเทศไทยมีจำนวนจำกัด ไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ภายในประเทศ ต้องนำเข้าถั่วเหลืองและผลิตภัณฑ์ถั่วเหลืองจากต่างประเทศเป็นจำนวนมาก โดยในปี พ.ศ. 2547 มีมูลค่าการนำเข้าถั่วเหลืองสูงถึง 14,000 ล้านบาท (สถิติการค้าสินค้าเกษตรกรรมไทยกับต่างประเทศ, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2546) จึงจำเป็นที่ภาครัฐจะต้องเข้ามามีบทบาทในการช่วยเหลือเกษตรกรผู้เพาะปลูกถั่วเหลืองให้มีความรู้และความชำนาญ จนกระทั่งสามารถเพิ่มผลผลิตถั่วเหลืองภายในประเทศให้สูงขึ้นเพื่อลดการนำเข้าจากต่างประเทศลง ตลอดจนส่งเสริมการนำถั่วเหลืองไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูง เพื่อจูงใจให้เกษตรกรหันมาเพาะปลูกถั่วเหลืองกันมากขึ้น

## 1. การแปรรูปผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม

ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่มีวางจำหน่ายในท้องตลาดนั้น มีทั้งที่ผลิตจากโรงงานอุตสาหกรรมและผลิตกันเองภายในครัวเรือน ผู้บริโภคสามารถผลิตเนื้อเทียมได้ โดยผสมแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน กุณเดน 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 แป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน และโปรตีนถั่วเหลืองเข้มข้น โดยได้นำโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมาช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงหน้าที่ของเนื้อเทียมให้ดีขึ้นอีกด้วย (Maurice and Stanley, 1978; Sheard, Ledward, and Mitchell, 1984) ส่วนงานวิจัยที่นำแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มมาเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเนื้อเทียมยังมีอยู่น้อย เนื่องจากไขมันที่มีอยู่นั้นกระทำตัวเป็นสารหล่อลื่น ทำให้วัตถุดิบไหลผ่านสกรูและบารเรล ออกมาในระยะเวลาสั้นด้วยความดันต่ำ ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่ได้จึงไม่มีลักษณะโครงสร้างแบบเส้นใยคล้ายเนื้อสัตว์ (Gwiazada, Noguchi, and Saio, 1987; Bhattacharya and Hanna, 1988) แต่อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม นอกจากจะให้ลักษณะเนื้อสัมผัส ลักษณะปรากฏ และความรู้สึกในปากคล้ายกับเนื้อสัตว์แล้ว ยังให้ความนุ่ม ชุ่มฉ่ำ และความเลี่ยนมันซึ่งเป็นลักษณะเด่นของเนื้อสัตว์อีกด้วย (Guy, 1994) ซึ่งอาจทำให้เนื้อเทียมได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคมากยิ่งขึ้น

## 2. สภาวะการแปรรูปเนื้อเทียมด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

ลักษณะโครงสร้าง เนื้อสัมผัส และสมบัติเชิงหน้าที่ของเนื้อเทียมที่ผลิตด้วยการเอกซ์ทรูชันได้รับผลกระทบจากหลายปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ค่า pH แรงเฉือน (shear force) ธรรมชาติและปริมาณของโปรตีน คาร์โบไฮเดรตและไขมัน รวมทั้งองค์ประกอบอื่นๆ ที่เป็นส่วนผสมในวัตถุดิบ (Phillips and Finley, 1989) จากงานวิจัยของ Cumming, Stanley และ de Man ในปี 1972 พบว่าเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการเอกซ์ทรูชันเพิ่มขึ้น ทำให้แรงเฉือนและงานของแรงเฉือนของเอกซ์ทรูเดตเพิ่มขึ้น มีผลให้ความหนาแน่นของเอกซ์ทรูเดตลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Bhattacharya, Hanna และ Kaufman (1986) ที่พบว่าเมื่อแรงเฉือนเพิ่มขึ้น จะทำให้เอกซ์ทรูเดตมีความหนาแน่นลดลง ทำให้อัตราส่วนการพองตัวและความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่เมื่อเพิ่มความชื้น

ของวัตถุดิบ จะทำให้อัตราส่วนของการพองตัวลดลง มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และเมื่อลดอุณหภูมิในกระบวนการผลิตลงพร้อมกันกับที่เพิ่มความชื้นด้วยแล้ว จะทำให้เนื้อสัมผัสของเอกซ์ทรูเดตที่แห้งหลังผ่านเอกซ์ทรูชันมาใหม่นั้น มีค่า hardness, chewiness และ springiness ลดลง (Lin, Huff, and Hsieh 2002) เนื่องจากเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันและทอร์คภายในเอกซ์ทรูเดอร์ลดลง แรงเฉือนที่กระทำต่อวัตถุดิบลดลง ดังนั้นการผสมและการขึ้นเนื้อสัมผัสจึงเกิดขึ้นน้อย (Maurice and Stanley, 1978) สภาพความเป็นกรดและค่าส่งผลต่อการจัดเรียงตัว (conformation) และอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของโปรตีนถั่วเหลือง (protein-protein interaction) (Hemmansson, 1979) โดย Dahl และ Villota (1991) ได้เสนอไว้ว่า อิทธิพลของ pH ที่มีต่อโปรตีนนั้นส่งผลต่อการขยายตัวและการพัฒนา plexilamella structure ของผลิตภัณฑ์ พวกเขาพบว่าโปรตีนถั่วเหลืองที่มีความเป็นกรด ให้เอกซ์ทรูเดตที่มีอัตราการขยายตัวต่ำ และมีงานของการเลื่อนเพิ่มขึ้น ไม่พบการจัดเรียงตัวแบบเส้นใย และเมื่อปรับให้โปรตีนถั่วเหลืองมีความเป็นด่างสูงแล้วนำมาทำเอกซ์ทรูชัน พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะหลวมขึ้น และโครงสร้างของเอกซ์ทรูเดตแยกตัวออกจากกันหลังแช่น้ำ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Atkinson (1970) ที่พบว่าเมื่อทำการเอกซ์ทรูชันในสภาวะที่มีค่า pH 5.5 จะดำเนินการผลิตได้ยาก และผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อนำไปแช่น้ำแล้วจะพบว่าเนื้อสัมผัสของเอกซ์ทรูเดตมีลักษณะยืดเหนียว (rubbery) และมีรสเปรี้ยว และเมื่อทำการเอกซ์ทรูชันในสภาวะที่มีค่า pH มากกว่า 8.5 ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรสฝาด ดังนั้นจึงได้แนะนำว่าควรทำการแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหาร โปรตีนที่เลียนแบบเนื้อสัตว์ในช่วง pH 6.5 ถึง 7.5

### 3. ปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะของเนื้อเทียม

องค์ประกอบ ปริมาณ และคุณภาพของโปรตีนถั่วเหลือง มีผลต่อลักษณะทางกายภาพ พันธะเคมี และสมบัติเชิงหน้าที่ของเนื้อเทียม โครงสร้างหลักที่เป็นเส้นใยแบบไฟเบอร์ (fiber) และเลเยอร์ (layer) ของเนื้อเทียมที่ให้ลักษณะคล้ายเนื้อสัตว์ เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนกับโปรตีนและระหว่างโปรตีนกับองค์ประกอบอื่นๆ โดยชนิดพันธะเคมีที่เชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของโปรตีนนั้น ยังเป็นข้อโต้แย้งกันในรายละเอียดหลายประเด็นด้วยกัน นักวิจัยบางท่านได้เสนอว่าพันธะไดซัลไฟด์ พันธะไฮโดรเจน และอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก ที่พบอยู่ในเอกซ์ทรูเดตนั้นมีส่วนสนับสนุนโครงสร้างภายในของเอกซ์ทรูเดตให้มีความเสถียร (Sheard et al., 1984; Hager, 1984) โดย Sheard และคณะ (1984) รายงานว่าพันธะไดซัลไฟด์เป็นพันธะที่มีความสำคัญอย่างมากในการเกิดเนื้อสัมผัสของโปรตีนถั่วเหลือง ส่วนพันธะไฮโดรเจนและอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิกมีความสำคัญต่อโครงสร้างเพียงเล็กน้อย และไม่มีพันธะเคมีชนิดอื่นเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน Hayakawa (1992) ได้ยกประเด็นที่ว่าพันธะไดซัลไฟด์ไม่ได้มีบทบาทสำคัญต่อโครงสร้างของเอกซ์ทรูเดตมากนัก เนื่องจากพันธะไดซัลไฟด์เกิดแตกแยกออกจากกันในระหว่างการแปรรูป ซึ่งทำให้โปรตีนมีขนาดเล็กลงและเป็นเส้นตรงมากขึ้น ส่วนงานวิจัยของ Rhee และคณะ (1981) และ Hager (1984) ได้เสนอว่ามีพันธะไดซัลไฟด์เกิดขึ้นใหม่เมื่อผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันและกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างโปรตีนของเอกซ์ทรูเดต



นอกจากพันธะเคมีทั้งสามชนิดที่กล่าวมาแล้ว ยังมีนักวิจัยท่านอื่นๆ (Burgess and Stanley, 1976; Jeunink and Cheftel, 1979; Lin et. al., 2000) ที่รายงานถึงพันธะเปปไทด์ที่อาจเกิดขึ้นระหว่างเอ็กซ์ทรูชัน โดย Burgess และ Stanley (1976) อ้างว่าพันธะเปปไทด์ระหว่างโมเลกุล (intermolecular peptide bond) ที่เกิดขึ้นในระหว่างเอ็กซ์ทรูชันมีส่วนช่วยในการเกิดเนื้อสัมผัสของเอ็กซ์ทรูเดตเป็นอย่างมาก และจากผลการทดลองของ Lin และคณะ (2000) พบว่าระหว่างการเอ็กซ์ทรูชันอาจเกิดโพลีเมอร์มวลโมเลกุลสูง หรือพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลอื่นๆ ขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ความสามารถในการละลายของโปรตีนถั่วเหลืองที่ผ่านกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันลดลง ทั้งนี้เนื่องจากประกอบของวัตถุดิบและสภาวะในการแปรรูปย่อมส่งผลให้เกิดพันธะเคมีที่สนับสนุนโครงสร้างของเอ็กซ์ทรูเดตแตกต่างกันออกไป (Phillips and Finley, 1989) และยังไม่มียานวิจัยใดที่สามารถตรวจสอบชนิดและปริมาณของพันธะเคมีต่างๆ ที่เกิดขึ้นในเอ็กซ์ทรูเดตได้โดยตรง

ปริมาณโปรตีนในวัตถุดิบมีอิทธิพลต่อโครงสร้าง และเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ ซึ่งก่อให้เกิดโครงสร้างหลักที่เป็นเส้นใยคล้ายเนื้อสัตว์ (fibrous meat-like texture) ขึ้น (Stanley, 1989) Maurice และ Stanley (1978) และ Kazemzadch, Diehl, Rhee และ Dahm (1986) รายงานว่าเมื่อปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นทำให้เอ็กซ์ทรูเดตมีเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น และมีค่าของแรงเหนียวมากขึ้น โดย Nelson และ Leigh (1983) และ Kearns, Rokey และ Huber (1989) มีความเห็นที่สอดคล้องกันว่าในการทำเนื้อเทียมจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์นั้นควรมีปริมาณโปรตีนอย่างน้อยร้อยละ 50 ขึ้นไป คุณภาพของโปรตีนมีความสำคัญต่อสมบัติเชิงหน้าที่ของเอ็กซ์ทรูเดตจากโปรตีนถั่วเหลือง โดยใช้ความสามารถในการละลายของโปรตีนมาเป็นดัชนี คือ nitrogen solubility index (NSI) Frazier และ Crawshaw (1984) รายงานการเอ็กซ์ทรูชันแป้งถั่วเหลืองที่มีอนุภาคหยาบ (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 ร้อยละ 70 มาเป็นส่วนผสมในการเอ็กซ์ทรูชันทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติเชิงหน้าที่และการไหลที่ดี ทำให้ผลิตภัณฑ์มีอัตราการดูดซับน้ำ (water absorption ratio) และอัตราการคืนน้ำกลับคืน (rehydration ratio) ที่ดี

ความสามารถในการดูดซับน้ำของคาร์โบไฮเดรต มีอิทธิพลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ Rhee, Kuo และ Lusas (1981) รายงานว่าคาร์โบไฮเดรตที่มีความสามารถละลายได้ (soluble carbohydrate) ไม่มีบทบาทสำคัญต่อโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ แต่อาจเกี่ยวข้องกับการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เข้าร่วมในปฏิกิริยา (non-enzymatic reaction) ซึ่งอาจส่งผลต่อคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์ (Phillips and Finley, 1989) ส่วนคาร์โบไฮเดรตที่ไม่สามารถละลายได้ (insoluble carbohydrate) อาทิ

เช่น โยอาหาร (dietary fiber) มีอิทธิพลต่อโครงสร้างภายในแบบโพรงอากาศ (air cell) ของผลิตภัณฑ์ โดย Lue, Hsieh และ Huff (1991) เสนอว่าการเพิ่มปริมาณโยอาหารจากต้นบีททำให้การขยายตัวของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวโพดในแนวรัศมีลดลง แต่มีการขยายตัวทางยาวเพิ่มขึ้น ช่องโพรงอากาศมีขนาดเล็กลงไม่สม่ำเสมอ เมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่เติมโยอาหารจากต้นบีทในปริมาณที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ Smith (1974) รายงานว่าการเอกซ์ทรูชันก่อให้เกิดการสูญเสียสภาพดั้งเดิมของโปรตีนถั่วเหลือง และทำให้คาร์โบไฮเดรตถั่วเหลืองร้อนอย่างรวดเร็ว เมื่อส่วนผสมของโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตเกิดการพองตัว ทำให้เกิดโครงสร้างเส้นใยจากส่วนของโปรตีน มีส่วนของคาร์โบไฮเดรตไปฝังตรึง (embed) อยู่กับโครงสร้างเส้นใยนั้น จึงเกิดลักษณะของโครงสร้างแบบ plexilamella ขึ้น ซึ่ง Sheard, Ledward และ Mitchell (1984) ได้ยืนยันว่าคาร์โบไฮเดรตที่ฝังตรึงในโครงสร้างเส้นใยนั้น มีส่วนช่วยสนับสนุนโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ให้มีความเสถียรมากขึ้น

ไขมันที่มีอยู่ในส่วนผสมนั้นส่งผลกระทบต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมากในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ไขมันเป็นสารหล่อลื่น (lubricant) ลดแรงเสียดและลดการจัดเรียงตัวของอนุภาคลงได้ (Cheftel, Kitagawa, and Queguiner, 1992) ไขมันมีส่วนทำให้ความหนืดของโดลดลง ทำให้ความดันก่อนถึงหัวแบบไม่เพียงพอต่อการเกิดโครงสร้างแบบเส้นใยของผลิตภัณฑ์ (Ha, 1992) จากงานวิจัยของ Kearns และคณะ (1989) อ้างว่าการผลิตเนื้อเทียมจากวัตถุดิบที่มีไขมันอยู่ร้อยละ 0.5 – 6.5 โดยน้ำหนัก จำเป็นต้องให้พลังงานในการเลื่อนเพิ่มขึ้นและปรับอุณหภูมิในกระบวนการแปรรูปให้สูงขึ้น รวมทั้งการนำรูปแบบการจัดเรียงสกรูที่ให้แรงเสียดสูงมาใช้ในการผลิตด้วย เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความสมบูรณ์ตามต้องการ จากการทำเอกซ์ทรูชันด้วยแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มของ Gwiazada, Noguchi และ Saio (1987) พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่มีโครงสร้างแบบเส้นใยคล้ายของแข็ง (solid fibrous structure) แต่เมื่อเติมแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมันลงไปในอัตราส่วนหนึ่งต่อหนึ่งทำให้เกิดโครงสร้างชนิดนี้ขึ้นได้ Hayakawa (1992) สามารถทำเอกซ์ทรูชันจากแป้งไขมันเต็มที่มีไขมันเป็นองค์ประกอบร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีโครงสร้างและเนื้อสัมผัสที่ดี แต่มีรูพรุนขนาดใหญ่โดยที่ผนังของรูพรุนมีไขมันเป็นส่วนประกอบ ทำให้ความแน่น (compactness) ของเนื้อสัมผัสลดลง เป็นไปได้ว่าไขมันอาจขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนที่ก่อให้เกิดเนื้อสัมผัสของเอกซ์ทรูเดต ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่มีไขมันอยู่มากจึงมีลักษณะไม่แน่นเนื้อ มีการพองตัวน้อย และมีความสามารถในการกักเก็บน้ำต่ำ (Bhattacharya and Hanna, 1988) ส่วน Horvath และ Czukor (1993) ทำการเอกซ์ทรูชันวัตถุดิบที่มีแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มอยู่ที่อุณหภูมิและความชื้นสูง พบว่ามีไขมันอิสระแยกตัวออกมาจากแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มได้ นอกจากนี้ Leigh (1978) ได้นำแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มไปใช้ในสารละลายต่างก่อนนำไปเข้าสู่กระบวนการเอกซ์ทรูชัน พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีเนื้อสัมผัสหลังคุดน้ำกลับคืนดีขึ้น โครงสร้างไม่แตกแยกออกจากกัน

#### 4. การปรับปรุงคุณภาพของเนื้อเทียม

การปรับปรุงคุณภาพของเนื้อเทียมให้มีลักษณะตรงตามความต้องการของผู้บริโภคนั้น ได้มีการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาขึ้นมาโดยตลอด โดยการปรับปรุงกระบวนการแปรรูป และการพัฒนาอุปกรณ์เพิ่มเติมให้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (Wenger, Osterhaus, and Smith, 1975; Sakata, Otsubo, Kugitani, Baba, and Hirotsuka, 1999; Ha, 1992) รวมทั้งการนำวัตถุดิบและสารเติมแต่งอื่นๆ มาช่วยปรับปรุงคุณภาพของเนื้อเทียม (Atkinson, 1970; Boison, Toranto and Cheryan, 1983; Kearns et al., 1989; Moore, 1994) จากงานวิจัยของ Rhee และคณะ (1981) พบว่าเนื้อเทียมจากแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมันที่มีส่วนผสมของโพแทสเซียมไอโอเดต 0.01 และ 0.05 เปอร์เซ็นต์ ที่แปรรูปด้วยเครื่องสร้างเนื้อสัมผัสด้วยการกดอัด (hand press texturizer) ที่ความชื้น 25 เปอร์เซ็นต์ ได้เนื้อเทียมที่มีรูปร่างแบบแท่ง ไม่พองตัว ผิวหน้าหยาบ มีความเครียดและโครงสร้างแบบเส้นใยน้อย ในขณะที่เติมสารที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ เช่น ซิสเตอีน ประมาณ 0.1-0.5 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ความหนาแน่นจำเพาะของเอกซ์ทรูเดตจากโปรตีนถั่วเหลืองลดลง และมีความสามารถในการกักเก็บน้ำเพิ่มขึ้น แต่จากการศึกษาของ Li และ Lee (1996b, 1998) รายงานว่าการเติมซิสเตอีน 0.25-1.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นสารรีดิวซ์ในแป้งสาลีเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการทำเอกซ์ทรูชัน พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีอัตราการขยายตัว และความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง ผลิตภัณฑ์มีขนาดของรูพรุนลดลง รวมทั้งมีผนังรูพรุนบางลง อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานการใช้โพแทสเซียมโบรมเมท ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ซึ่งในกระบวนการเอกซ์ทรูชันของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง ทั้งนี้การเติมโพแทสเซียมโบรมเมทในวัตถุดิบเพื่อใช้ในการแปรรูปเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง อาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธะไคซัลไฟด์ของโครงสร้างโปรตีน ซึ่งอาจทำให้เนื้อเทียมมีเนื้อสัมผัสที่แข็งแรงขึ้น เนื่องจากมีรายงานเบื้องต้นว่าพันธะไคซัลไฟด์เป็นพันธะที่มีบทบาทต่อโครงสร้างของโปรตีนในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด เช่น ขนมปัง เต้าหู้ และเนื้อเทียม เป็นต้น (Kohman, Hoffman, and Godfrey, 1915; Sheard et al., 1984) โดยเห็นได้อย่างชัดเจนในการทำผลิตภัณฑ์เบเกอร์ที่ได้นำสารออกซิไดซ์และสารรีดิวซ์มาใช้เป็นส่วนผสมร่วมกับส่วนผสมหลักที่เป็นแป้งสาลี ซึ่งมีส่วนปรับปรุงลักษณะของผลิตภัณฑ์ได้อย่างชัดเจน

นอกจากนี้การเติมโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตจากแหล่งอื่นๆ ที่นอกเหนือจากถั่วเหลือง สามารถช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสและสมบัติเชิงหน้าที่ของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองได้ Lin และคณะ (2000, 2002) เติมสตาร์ชสาลี 10 เปอร์เซ็นต์ ในโปรตีนถั่วเหลืองสกัดก่อนนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่ความชื้นสูง 60 เปอร์เซ็นต์ ได้เนื้อเทียมที่มีเนื้อสัมผัสแน่นเหนียว และมีโครงสร้างแบบเส้นใยคล้ายเนื้อสัตว์มาก และจากงานวิจัยของ วิษฐิศา จันทรพรชัย, เพ็ญขวัญ ชมปริดา และวิชัย หฤทัยธนาสันต์ (2537) พบว่าปริมาณของกลูเตนสาลีในอัตรา 40 เปอร์เซ็นต์ เป็นระดับที่เหมาะสมที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตเนื้อเทียมจากแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน ทำให้ได้เนื้อเทียมที่มีความแข็งแรงและมีคุณภาพดีขึ้น แสดงว่าการเติมวัตถุดิบต่างๆ เหล่านี้ในเนื้อเทียมจากโปรตีน

ถั่วเหลือง อาจมีส่วนช่วยปรับปรุงสมบัติทางการไหลของเนื้อเทียมในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน แต่ทั้งนี้ยังไม่มียานวิจัยที่นำแป้งสาทิมาเป็นส่วนผสมในการแปรรูปเนื้อเทียมร่วมกับโปรตีนจากถั่วเหลือง ซึ่งการนำแป้งสาทิมาใช้นอกจากอาจมีส่วนช่วยปรับปรุงคุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัส และสมบัติเชิงหน้าที่ของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองแล้ว ยังช่วยปรับปรุงคุณค่าทางสารอาหารของโปรตีนให้ทัดเทียมโปรตีนจากเนื้อสัตว์ได้ รวมทั้งการที่แป้งสาทิมีราคาถูกลง จึงอาจทำให้เนื้อเทียมมีราคาถูกลงได้

#### 5. เนื้อเทียมที่มีไขมันเป็นองค์ประกอบ

การแปรรูปเนื้อเทียมจากแป้งถั่วเหลือง ไขมันเต็ม ได้รับความสนใจในการศึกษาและพัฒนาจากนักวิจัยหลายท่าน (Gwiazada et al., 1987; Nelson and Leigh, 1983) จากการศึกษาของสมชาย ประภาวัต (2532) ที่ได้ผลิตเนื้อเทียมหรือโปรตีนเกษตรจากแป้งถั่วเหลือง ไขมันเต็มด้วยเครื่องวิลเลจเทคเจอร์ไรเซอร์ (village texturizer) พบว่าเนื้อเทียมที่ผลิตที่ความชื้นสูง 45 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิสูง 200-210 องศาเซลเซียส ได้รับความยอมรับของผู้ทดสอบทางด้านารพองตัว สี รูปร่างของผลิตภัณฑ์ และความชอบต่ำกว่าโปรตีนเกษตรที่ผลิตที่ความชื้นต่ำประมาณ 35-40 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิต่ำ 160-190 องศาเซลเซียส ส่วนผลการทดลองของ Hayakawa (1992) พบว่าเนื้อเทียมที่ทำจากแป้งถั่วเหลือง ไขมันเต็มที่มีไขมันอยู่ 25 เปอร์เซ็นต์ ด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ มีลักษณะโครงสร้างและเนื้อสัมผัสที่ดี แต่พบว่ามีความชื้นสูงและมีไขมันเป็นส่วนประกอบของผนังของช่องว่างนั้น ซึ่งทำให้ความแน่นเนื้อของเนื้อสัมผัสลดลง จึงเป็นไปได้ว่าไขมันอาจขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของโปรตีน จึงทำให้โครงสร้างเนื้อเทียมอ่อนตัว มีเนื้อสัมผัสหวมไม่แน่น พองตัวน้อย และมีความสามารถในการกักเก็บน้ำต่ำ (Bhattacharya and Hanna, 1988) เมื่อ Horvath และ Czukor (1993) ทำการเอกซ์ทรูด์วัตถุดิบที่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลือง ไขมันเต็ม ที่อุณหภูมิและความชื้นสูง พบว่ามีไขมันอิสระแยกตัวออกมาจากเอกซ์ทรูเดต จึงจำเป็นต้องเพิ่มพลังงานในการเจือและอุณหภูมิในการแปรรูปให้สูงขึ้น เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพที่ดีตรงตามความต้องการสูง และมีการเสียไขมันน้อยที่สุด (Kearns et al., 1989; Pilli et al., 2004) ซึ่งจากรายงานผลการศึกษที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่ามีผู้สนใจศึกษาการเอกซ์ทรูชันผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลือง ไขมันเต็มเป็นจำนวนมาก ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่เนื้อเทียมที่มีไขมันเป็นองค์ประกอบ สามารถสร้างเนื้อสัมผัส ลักษณะปรากฏ และความรู้สึกในปากที่มีลักษณะนุ่ม ชุ่มฉ่ำและความเหนียวคล้ายกับเนื้อสัตว์ โดยที่เนื้อเทียมยังคงให้คุณค่าทางสารอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายและพลังงานสูงกว่าเนื้อเทียมชนิดอื่นๆ รวมทั้งการที่แป้งถั่วเหลือง ไขมันเต็มมีราคาถูกเพราะสามารถผลิตได้ภายในประเทศ จึงทำให้เนื้อเทียมมีราคาถูกลงได้ ซึ่งสามารถช่วยลดการนำเข้าของแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมันและโปรตีนถั่วเหลืองสกัดจากต่างประเทศ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากถั่วเหลือง ซึ่งเป็นได้ทั้งอาหารเพื่อสุขภาพและอาหารสำหรับกลุ่มผู้บริโภคอาหารมังสวิรัต โดยศึกษาส่วนผสมชนิดต่างๆ คือ โปรตีนถั่วเหลืองสกัด โปแทสเซียมโบรเมท และแป้งสาทิ เพื่อปรับปรุงคุณภาพเนื้อเทียมที่ผลิตด้วยกระบวนการ

เอกซ์ทราชัน โดยตรวจสอบโครงสร้างของเนื้อเทียมในระดับต่างๆ ทั้งทางด้านกายภาพและเคมี เพื่อความเข้าใจในการสร้างโครงสร้างของเนื้อเทียมจากแป้งถั่วเหลือง นอกจากนี้ก็ได้ศึกษาการใช้แป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มที่ผลิตภายในประเทศเป็นส่วนผสมในการผลิตเนื้อเทียม เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการใช้ประโยชน์แป้งถั่วเหลืองที่ผลิตได้ภายในประเทศ

## บทที่ 2

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### การวิเคราะห์หาสารไอโซฟลาโวนส์ในถั่วเหลืองและผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลือง

##### 1. วัตถุดิบ

ถั่วเหลืองสายพันธุ์ สจ.1 สจ.2 สจ.4 สจ.5 สท.1 สท.2 ชม.2 ชม.60 และ นว.2 ถั่วเขียวสายพันธุ์ กพส.1 กพส.2 และ มทส.1 ถั่วฝักยาวสายพันธุ์ มทส.1(ถั่วฝักยาวไร้ค้าง) จากสาขาวิชาเทคโนโลยีผลิตพืช มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ถั่วแดงยี่ห้อเอราวัณเลิศ ถั่วดำยี่ห้อเอราวัณเลิศ และ ถั่วพุ่มพันธุ์นางแดง จากท้องตลาด

##### 2. สารเคมี

Standard isoflavone 4 ชนิด คือ daidzin, genistein (code30408, Biochemika), genistin (#G0897, Sigma) และ daidzein (#D7802, Sigma) จากบริษัทอิตัลมาร์ ประเทศไทย จำกัด methanol (Carlo Erba), disodium fluorescein (internal standard) (Carlo Erba), glacial acetic acid (Carlo Erba), acetonitrile(Carlo Erba) และ NaOH(Carlo Erba) จากบริษัทอิตัลมาร์ ประเทศไทย จำกัด

##### 3. วิธีการทดลอง

###### 3.1 การสกัดสารไอโซฟลาโวนส์ จากเมล็ดถั่วเหลืองและเมล็ดถั่วต่างๆ

คัดแปลงจากวิธีการของ Swanson et al. (2004) โดยนำมาเมล็ดถั่วเหลืองสายพันธุ์ต่าง ๆ และถั่วชนิดต่างๆ มาชั่งน้ำหนักและเก็บไว้ใน vacuum desiccators เพื่อให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นนำมาบดด้วยเครื่องบด และชั่งน้ำหนักถั่วเหลืองที่บดแล้ว 1 g ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml เติมสารละลาย 80% methanol (v/v) ลงไป 40 ml ปิดปากขวดด้วย parafilm และ aluminium foil จากนั้นนำไปเข้าเครื่อง shaking water bath ที่อุณหภูมิ 65°C 2 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วเติมสารละลาย 2 M NaOH 3 ml นำไปเข้าเครื่อง Shaking water bath อีกครั้งที่อุณหภูมิห้อง 10 นาที จากนั้นเติม glacial acetic acid 1 ml และนำมากรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No.42 โดยนำส่วนที่กรองได้ 5 ml มาผสมกับน้ำ deionized water 4 ml และสารละลาย 80% methanol (v/v) 1 ml จากนั้นเติม internal standard (disodium fluorescein) ความเข้มข้น 1000 ppm ปริมาณ 0.4 ml ลงในขวดปรับปริมาตร 10 ml และเติมสารละลายตัวอย่างลงไปจนครบปริมาตร จากนั้นนำมา กรองด้วย nylon membran filter 0.45  $\mu\text{m}$  ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC

### 3.2 การสกัดสารไอโซฟลาโวนส์ จากเนื้อเทียมและโยเกิร์ตด้วยเครื่องผง

ดัดแปลงจากวิธีการของ Mahungu et al. (1999) โดยชั่งน้ำหนักเนื้อเทียมที่ผ่านการบดแล้วและโยเกิร์ตด้วยเครื่องผง 2 g ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml เติมน้ำกลั่น (deionized water) ปริมาตร 5 ml ลงไปเพื่อให้ตัวอย่างนุ่ม ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 4 ชั่วโมง จากนั้นเติม methanol 20 ml และนำไปเข้าเครื่อง shaking water bath ที่อุณหภูมิ 30°C 2 ชั่วโมง และนำมากรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No.42 ล้างตะกอนที่เหลือด้วยสารละลาย 80% methanol (v/v) นำส่วนที่กรองได้มาทำให้แห้งด้วยการระเหยเอา methanol ออกโดยใช้ shaking water bath ที่อุณหภูมิ 35°C ประมาณ 5 ชั่วโมง จากนั้นนำมาระเหยน้ำออกโดยใช้วิธี freeze drying (Heto drying, ประเทศไทย) นำตัวอย่างที่ผ่านการ freeze dry มาละลายด้วยสารละลาย 80% methanol (v/v) 5 ml มาผสมกับน้ำ กลั่น 4 ml และสารละลาย 80% methanol (v/v) 1 ml จากนั้นเติม internal standard (disodium fluorescein) ความเข้มข้น 1000 ppm ปริมาณ 0.4 ml ลงในขวดปรับปริมาตร 10 ml และเติมสารละลายตัวอย่างลงไปจนครบปริมาตร จากนั้นนำมา กรองด้วย nylon membrane filter 0.45  $\mu\text{m}$  ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC

### 3.3 การเตรียม Standard stock solution

เตรียม isoflavone standard stock solution โดยการละลายสาร standard isoflavone (daidzin, genistein, daidzein และ genistein) ในสารละลาย 80% methanol (v/v) จากนั้นนำไป sonicate ที่ 60% ultrasonic power ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 คืน และนำมา sonicate ที่สถานะเดิมอีก 2 ชั่วโมง นำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 5°C เพื่อใช้เป็น stock solution

### 3.4 การเตรียม Standard solution สำหรับการหา Calibration curve

เตรียม standard solution ความเข้มข้น 2, 4, 8, 16 และ 32 ppm ปริมาตร 10 ml โดยเจือจางด้วยสารละลาย 80% methanol (v/v) จากนั้นเติม internal standard (disodium fluorescein) ความเข้มข้น 1000 ppm ปริมาตร 0.4 ml และเติม standard solution ที่ความเข้มข้นต่างๆ จนครบปริมาตร 10 ml นำมากรองด้วย nylon membrane filter 0.45  $\mu\text{m}$  ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง high performance liquid chromatography (HPLC) (Hewlett Packard, series 1100, USA)

### 3.5 วิธีการวิเคราะห์สารไอโซฟลาโวนส์ด้วย HPLC

ดัดแปลงจากวิธีการของ Grün et al. (2001) โดยใช้  $C_{18}$  reversed phase column (ODS hypersil 5  $\mu\text{m}$ , 250 mm x 4 mm), flow rate 1.7 ml/min, column temperature 35°C, mobile phase A = 0.1% acetic acid in water, mobile phase B = 0.1% acetic acid in acetonitrile โดย run แบบ linear gradient เริ่มต้นด้วย 90%A 10%B จนกระทั่งค่อยๆเปลี่ยนเป็น 72%A 28%B จนถึงเวลาที่ 35 จากนั้นคงที่ไว้จนถึงเวลาที่ 45 ใช้ diode array เป็น detector ที่ 254 nm.

## โยเกิร์ตถั่วเหลืองผง

### 1. วัตถุดิบและสารเคมี

ถั่วเหลืองซีก (Splited Soy Bean) ตราไร้ทิพย์ จากบริษัท Thai Cereal World จำกัด น้ำตาลทรายขาวตรามิตรผล จากบริษัทน้ำตาลมิตรผล จำกัด K-carrageenan ME10 และ Pectin จากบริษัทไทยฟู๊ดแอนด์ เคมิคอล จำกัด Xanthan gum และ Locust bean gum จากบริษัท Degussa Texturant System (Thailand) National<sup>r</sup> frigex(chemically modified tapioca starch), Novation 8300(chemically modified waxy rice starch) และ Novation 2300 (physically modified waxy maize starch ) จากบริษัท National starch & chemical จำกัด ประเทศไทย  $\text{NaHCO}_3$  (Merck, KgaA), D-Gluconic acid lactone (code G4750, Sigma-Aldrich) 2-Thiobabituric acid (code 88484, Fluka) และ 1,1,3,3-Tetraethoxypropane (code 86570, Fluka) จากบริษัทอิตัลมาร์(ประเทศไทย) จำกัด Commercial starture culture(FD-DVS CHI-Yo- Flex, CHR HANSEN) จากบริษัทอีสเอเชียติก(ประเทศไทย) จำกัด อาหารเลี้ยงเชื้อ MRS Agar (Hi-Media #641) และ peptone(Hi-Media) จากบริษัท โสภณแลป เซนเตอร์จำกัด

### 2. วิธีการทดลอง

#### 2.1 การเตรียมน้ำนมถั่วเหลือง

นำถั่วเหลืองซีก (Splited Soy Bean) แช่ในน้ำอุณหภูมิห้องด้วยอัตราส่วน 1 : 2 (w/v) เป็นเวลา 14 -16 ชม. ล้างด้วยน้ำให้สะอาด จากนั้นแช่ถั่วเหลืองในสารละลาย 0.5%  $\text{NaHCO}_3$  ในอัตราส่วนถั่วเหลืองต่อสารละลายเท่ากับ 1 : 3 (w/v) และวางในน้ำอุณหภูมิ 85-90<sup>o</sup>C เป็นระยะเวลา 30 นาที เทสารละลายค้างทิ้ง ล้างค้างที่เหลือด้วยน้ำออกให้หมด นำถั่วเหลืองที่ได้ปั่นบดผสมกับน้ำอุณหภูมิ 80 – 85<sup>o</sup>C ด้วยเครื่องตีปั่นอาหาร(National, MX-T2GN) ในอัตราส่วนถั่วเหลืองต่อน้ำเท่ากับ 1 : 6 (w/v) ที่ความเร็วสูงสุดเป็นระยะเวลา 3 นาที (Pongsawatmanit and Suklampoo, 1996) จากนั้นนํานมแยกกากด้วยเครื่องแยกกากโดยใช้ฉากรองแบบผ้าเพื่อกรองหยาบ และฉากรองไนลอนขนาด 60 mesh เพื่อกรองละเอียด ตามด้วยการกรองผ่านตะแกรงขนาด 100 mesh ซึ่งทำให้ได้น้ำนมถั่วเหลืองที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid) ประมาณ 8-10%

#### 2.2 การเตรียมนมถั่วเหลืองผง

##### 2.2.1 วิธี Spray drying

นำน้ำนมถั่วเหลืองที่เตรียมได้ ซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมดประมาณ 8-10% มา spray dry ด้วยเครื่อง spray dryer (ยี่ห้อ GEA Niro รุ่น A/S Gladsaxevej 305 DK 2860 Soeborg Denmark) โดยใช้ Air inlet temperature เท่ากับ 115<sup>o</sup>C และ Outlet temperature เท่ากับ 75 ± 1<sup>o</sup>C



### 2.2.2 วิธี Freeze drying

นำนมถั่วเหลืองที่เตรียมได้ ไปลดอุณหภูมิในห้องแช่แข็งจนอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง จากนั้นใส่นมถั่วเหลืองแช่เยือกแข็งลงในเครื่อง Freeze dryer (ยี่ห้อ HETO รุ่น FD 8ประเทศ เนเธอร์แลนด์) ที่ลดอุณหภูมิของ condenser ลงที่  $-40^{\circ}\text{C}$  และมีค่าสูญญากาศเท่ากับ 0.1 mbar เมื่อตัวอย่างแห้งแล้วให้นำตัวอย่างออกจากเครื่อง เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความชื้น ซึ่งทำการระเหิดแห้งจนนมถั่วเหลืองผงมีค่าความชื้นอยู่ในช่วง 8-14%

### 2.3 การเตรียม starter culture

นำนมถั่วเหลืองที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 8-9 % ปริมาณ 300 ml ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $121^{\circ}\text{C}$  เวลา 15 นาที ในเครื่อง autoclave ทำให้เย็นลงถึงอุณหภูมิ  $42\pm 1^{\circ}\text{C}$  ใส่ Commercial starter culture ซึ่งเป็นเชื้อผสมระหว่าง *Lb.bulgaricus* และ *S.thermophilus* ลงไป 150 mg นำไปบ่มที่อุณหภูมิ  $42\pm 1^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นเก็บ active starter culture ไว้ในห้องเย็นและใช้ภายใน 2 วัน

### 2.4 การเตรียมโยเกิร์ตถั่วเหลืองแบบเซ็ท (set yogurt)

เตรียมนมถั่วเหลืองตามวิธีการเตรียมนมถั่วเหลืองข้างต้น และปรับปริมาณของแข็งทั้งหมดในนมถั่วเหลืองให้มีปริมาณ 8%, 10% และ 12% ตามลำดับ โดยการเติมน้ำหรือนมถั่วเหลืองผง จากนั้นเติมน้ำตาล 8% (w/v) และเติม hydrocolloid 9 ชนิด คือ 0.5%K-carrageenan ME10, 0.5%Pectin, 0.5%Xanthan gum, 0.5%Locust bean gum(LBG), 1%Modified tapioca starch, 1.5%Modified Rice starch, 1.5%Corn starch, 0.5%ของ K-carrageenan ME10 ผสมกับ LBG ในอัตราส่วน 1:1 และ 0.5% ของ Xanthan gum ผสมกับ LBG ในอัตราส่วน 1:1 ให้ความร้อนเล็กน้อยและกวนตลอดเวลาเพื่อให้ส่วนผสมทั้งหมดละลายเป็นเนื้อเดียวกัน นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $85-90^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 15 นาที (Lee et al., 1990) จากนั้นทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิ  $42\pm 1^{\circ}\text{C}$  ใส่ commercial starter culture ซึ่งเป็นเชื้อผสมระหว่าง *Lb.bulgaricus* และ *S.thermophilus* ลงไป 5% นำไปบ่มที่อุณหภูมิ  $42\pm 1^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นวัดค่า pH และปริมาณกรดแลคติก และนำไปเก็บที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 12 ชั่วโมง นำไปวัดลักษณะเนื้อสัมผัสและการเกิด syneresis

### 2.5 การตรวจนับจำนวน Lactic acid bacteria ในโยเกิร์ตถั่วเหลือง

เจือจางโยเกิร์ตถั่วเหลืองด้วยสารละลาย 0.1% peptone จนได้ระดับความเข้มข้นที่ต้องการนำไป spread plate ในอาหารเลี้ยงเชื้อ MRS Agar จำนวน 2 plates แล้วบ่มที่อุณหภูมิ  $37^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 72 ชั่วโมง หลังจากครบ 72 ชั่วโมง นับจำนวนโคโลนีระหว่าง 25 - 250 โคโลนี และคำนวณออกมาในหน่วย cfu/ml

## 2.6 การตรวจนับจำนวน *Lb. bulgaricus* ในโยเกิร์ตถั่วเหลือง

เจือจางโยเกิร์ตถั่วเหลืองด้วยสารละลาย 0.1% peptone จนได้ระดับความเข้มข้นที่ต้องการนำไป spread plate ในอาหารเลี้ยงเชื้อ MRS Agar จำนวน 2 plates แล้วบ่มที่อุณหภูมิ 37°C ในสภาวะ anaerobe เป็นเวลา 72 ชั่วโมง หลังจากครบ 72 ชั่วโมง นับจำนวนโคโลนีระหว่าง 25 – 250 โคโลนี และคำนวณออกมาในหน่วย cfu/ml

## 2.7 การตรวจนับจำนวน *S. thermophilus* ในโยเกิร์ตถั่วเหลือง

เจือจางโยเกิร์ตถั่วเหลืองด้วยสารละลาย 0.1% peptone จนได้ระดับความเข้มข้นที่ต้องการนำไป spread plate ในอาหารเลี้ยงเชื้อ M17 Agar จำนวน 2 plates แล้วบ่มที่อุณหภูมิ 37°C ในสภาวะ aerobe เป็นเวลา 72 ชั่วโมง หลังจากครบ 72 ชั่วโมง นับจำนวนโคโลนีระหว่าง 25 – 250 โคโลนี และคำนวณออกมาในหน่วย cfu/ml

## 2.8 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของโยเกิร์ตถั่วเหลือง

นำโยเกิร์ตถั่วเหลืองปริมาตร 50 ml ที่บรรจุในถ้วยพลาสติกปิดจุกซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ  $5 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$  มาวัดลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส TA.XT2 Texture Analyzer (version 05.16 Equipped with 5-kg load cell) โดยใช้การวัดแบบ Back extrusion force ที่มี Back Extrusion Cell (A/BE) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm. ความเร็วที่ใช้ในการวัดคงที่ที่ 1 mm/s และระยะทางที่ใช้ในการวัด คือ 10 mm. โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

## 2.9 การวิเคราะห์ %Syneresis

ดัดแปลงจากวิธีการของ Dello et al, (2004) โดยนำตัวอย่างโยเกิร์ตถั่วเหลืองที่บรรจุในถ้วยพลาสติกปริมาตร 50 ml และบ่มครบตามเวลาที่ต้องการมาเก็บไว้ที่อุณหภูมิ  $5 \pm 1^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นวัดปริมาตรของน้ำที่แยกออกมาจากตัวอย่างโดยใช้กระบอกตวง และคำนวณ %syneresis จากสูตร

$$\% \text{ syneresis} = \frac{\text{volume of water (ml)} \times 100}{\text{volume of soy yoghurt (ml)}}$$

## 2.10 การทดสอบลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านเนื้อสัมผัสของโยเกิร์ตถั่วเหลือง

การทดสอบทางประสาทสัมผัสเฉพาะลักษณะเนื้อสัมผัสของโยเกิร์ตถั่วเหลืองใช้วิธี Quantitative Descriptive Analysis (QDA) โดยใช้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนแล้วจำนวน 10 คน ทดสอบคุณลักษณะด้าน syneresis, curd firmness, smoothness, chalkiness และ curd firmness liking ทำการเสิร์ฟตัวอย่างปริมาตร 50 ml โดยใส่ในถ้วยพลาสติกที่มีฉลากเป็นรหัสตัวเลขที่ได้จากตารางสุ่ม อุณหภูมิของตัวอย่างไม่เกิน 10 °C ให้ผู้ทดสอบบ้วนปากด้วยน้ำระหว่างการทดสอบแต่ละตัวอย่าง และใช้แครกเกอร์ช่วยในการกำจัดกลิ่นถั่วในระหว่างการทดสอบ

## 2.11 การศึกษาสภาวะในการเตรียมโยเกิร์ตถั่วเหลืองผง

นำโยเกิร์ตถั่วเหลืองที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 14%, 21% และ 28 % ซึ่งปรับโดยใช้ Soy protein isolate มาทำแห้งโดยใช้เครื่อง spray dryer ( ยี่ห้อ GEA Niro รุ่น A/S Gladsaxevej 305 DK 2860 Soeborg Denmark ) ที่ Air inlet temperature 3 ระดับ คือ 110 °C, 120 °C และ 130 °C ตามลำดับ และ Outlet temperature คงที่ที่ 70 °C นำตัวอย่างโยเกิร์ตถั่วเหลืองผงที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าความชื้น ค่าดัชนีการละลายตามวิธีการของ Mistry and Pulgar (1996) และปริมาณแลคติกแบคทีเรียที่หลงเหลืออยู่

## 2.12 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี

การหาปริมาณความชื้น ของแข็งทั้งหมด เถ้า โปรตีน ไขมัน และเยื่อใยในถั่วเหลืองซีก น้านมถั่วเหลืองและนมถั่วเหลืองผง ใช้วิธีการ AOAC (1984) ส่วนการหาปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ใช้ hand refractometer 0 ถึง 32°Brix (ATAGA, model N-12, USA ) สำหรับการหาปริมาณกรดในโยเกิร์ตถั่วเหลือง ใช้วิธีการไทเทรตกับสารละลาย 0.1 N NaOH โดยใช้ phenolphthalein เป็น indicator เทียบกรดที่ได้เป็นปริมาณกรดแลคติก ตามวิธีของ AOAC (1997) และการหาค่า pH ของโยเกิร์ตถั่วเหลือง ใช้เครื่อง pH meter (METTLER TOLEDO รุ่น MP220, Switzerland)

## 2.13 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของโยเกิร์ตถั่วเหลืองผงในระหว่างการเก็บรักษา

นำโยเกิร์ตถั่วเหลืองผงที่ผลิตจากสภาวะที่เหมาะสมมาเก็บในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ที่สภาวะสุญญากาศและเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 25 และ 45 °C โดยตัวอย่างที่เก็บที่ 25 °C สุ่มเก็บตัวอย่างทุก 2 อาทิตย์ ส่วนตัวอย่างที่เก็บที่ 45 °C สุ่มเก็บตัวอย่างทุก 1 อาทิตย์ โดยนำมาวิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่องวัดเทียบสี Chroma meter (Minolta, CR-300, Osaka, Japan) วิเคราะห์ค่าดัชนีการละลายตามวิธีการของ American Dairy Products Institute Method วิเคราะห์ค่า Thiobarbituric acid-reactive substance (TBARS) ตามวิธีการของ Visessanguan et al. (2004) และตรวจนับจำนวนแลคติกแบคทีเรีย

### 3. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ Factorial in a randomized complete design (CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลด้วย ANOVA และวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Dunman's Multiple range comparison test (DMRT) โดยโปรแกรม SAS (v 6.12, Sas Institute Inc., USA)

การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและเคมีของกากถั่วเหลืองจากโรงงานสกัดน้ำมันและการพัฒนาผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากถั่วเหลือง

#### 1. วัตถุดิบและการเตรียมวัตถุดิบสำหรับการแปรรูป

##### 1.1 วัตถุดิบ

##### 1.1.1 กากถั่วเหลือง 7 ชนิด ได้แก่

1) กากถั่วเหลืองของบริษัท น้ำมันพืชไทย จำกัด (มหาชน) ประกอบด้วย กากถั่วเหลืองภายในประเทศ (นกน) และกากถั่วเหลืองจากต่างประเทศ (นกด)

2) กากถั่วเหลืองของบริษัท อินดัสเตรียล เอ็นเตอร์ไพส จำกัด ประกอบด้วย กากถั่วเหลืองภายในประเทศ (อกน) กากถั่วเหลืองอาร์เจนตินา (อกอ) และกากถั่วเหลืองสหรัฐอเมริกา (อกส)

3) กากถั่วเหลืองของบริษัท ธนากร ผลิตภัณฑ์น้ำมันพืช จำกัด ประกอบด้วย กากถั่วเหลืองภายในประเทศ (ชกน) และกากถั่วเหลืองจากต่างประเทศ (ชกด)

1.1.2 โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (SPI) 5 ชนิด ได้แก่ Dragon Cloud EMS จากบริษัท The Solae Company (Yun Meng, China) Supro 515IP, Supro 500E, Supro 516 จากบริษัท The Solae Company (Memphis, Tennessee, USA) และ Profam 970 (PRF) จากบริษัท ADM Protein Specialties (Decatur, IL, USA.)

1.1.3 แป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน (DSF) จากบริษัท ADM Protein Specialties (Decatur, IL, USA.) แป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม (FSF) จากบริษัทคอคอบ้า ผลิตภัณฑ์อาหาร จำกัด แป้งสาธิตราหังส์ขาวของบริษัทยูไนเต็ดฟลาวมิลล์ จำกัด (มหาชน) ส่วนสตาร์ชสตาลี และกลูเตนสตาลีได้มาจาก Manildra Group (The Crescent, New South Wales, Australia) เก็บวัตถุดิบในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

##### 1.2 การเตรียมวัตถุดิบ

1.2.1 การเตรียมวัตถุดิบเพื่อศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของสภาวะการแปรรูป โดยใช้ส่วนผสมของ DSF และ SPI เป็นวัตถุดิบในอัตราส่วน 70 ต่อ 30 เปอร์เซ็นต์ เก็บวัตถุดิบที่ผสมแล้วในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในระหว่างรอการผลิต

1.2.2 การเตรียมวัตถุดิบเพื่อศึกษาระดับของ SPI ที่เหมาะสม โดยนำ DSF และ SPI มาผสมกันในอัตราส่วน SPI ที่ระดับ 20, 40, 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ (w/w) โดยมีปริมาณโปรตีนทั้งหมดของ

วัตถุดิบแต่ละสูตร ดังแสดงในตารางที่ 1 เก็บวัตถุดิบและวัตถุดิบที่ผสมแล้วในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

1.2.3 การเตรียมวัตถุดิบเพื่อศึกษาผลของโพแทสเซียมโบรเมท (PB) นำ DSF 80 เปอร์เซ็นต์ และ SPI 20 เปอร์เซ็นต์ (w/w) มาผสมกันแล้วนำมาเติม PB 0, 60, 120 และ 180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม รวมทั้งหมด 4 สูตร แล้วจึงผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วนำไปแปรรูปทันที

1.2.4 การเตรียมวัตถุดิบเพื่อศึกษาระดับของแป้งสาลี นำ DSF, SPI และแป้งสาลีมาผสมกันในอัตราส่วนแป้งสาลี 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์ (w/w) ดังตารางที่ 2 เก็บวัตถุดิบที่ผสมแล้วในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในระหว่างรอการผลิต

1.2.5 การเตรียมวัตถุดิบเพื่อการศึกษาผลของสตาร์สาลี กลูเตนสาลี และแป้งสาลี นำ DSF, SPI และแป้งสาลี หรือ สตาร์ชสาลี หรือ กลูเตนสาลี หรือ สตาร์ชสาลี และกลูเตนสาลี มาผสมกัน ในอัตราส่วนดังตารางที่ 3 รวม 5 สูตร เก็บวัตถุดิบที่ผสมแล้วในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในระหว่างรอการผลิต

1.2.6 การเตรียมวัตถุดิบเพื่อศึกษาปริมาณของ FSF โดยนำ DSF, SPI แป้งสาลี และ FSF มาผสมกันโดยควบคุมปริมาณ SPI และแป้งสาลีให้คงที่ที่ 30 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเติม FSF ลงในวัตถุดิบในปริมาณ 0 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ (w/w) โดยแทนที่ปริมาณ DSF ดังตารางที่ 4 เก็บวัตถุดิบที่ผสมแล้วในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในระหว่างรอการแปรรูป

1.2.7 การเตรียมวัตถุดิบเพื่อศึกษาผลสภาวะการแปรรูปของการเอกซ์ทรูชัน โดยนำ DSF, SPI, FSF และแป้งสาลี ในอัตราส่วน 30, 30, 20 และ 20 เปอร์เซ็นต์ มาผสมกัน และเก็บวัตถุดิบที่ผสมแล้วในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในระหว่างรอการแปรรูป

ตารางที่ 1 ปริมาณโปรตีนของวัตถุดิบที่มีส่วนผสมของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด 20, 40, 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์

| Formula | DSF <sup>(1)</sup><br>(%) | SPI <sup>(2)</sup><br>(%) | Total protein content<br>(%) |
|---------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|
| 1       | 80                        | 20                        | 58                           |
| 2       | 60                        | 40                        | 66                           |
| 3       | 40                        | 60                        | 74                           |
| 4       | 20                        | 80                        | 82                           |

<sup>(1)</sup> แป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน

<sup>(2)</sup> โปรตีนถั่วเหลืองสกัด

ตารางที่ 2 ปริมาณส่วนผสม และ โปรตีนทั้งหมดในวัตถุดิบ สำหรับการแปรรูปเนื้อเทียมที่มี  
ส่วนผสมของแป้งสาลี 0, 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์

| Formula | SPI <sup>(2)</sup><br>(%) | DSF <sup>(1)</sup><br>(%) | WF <sup>(1)</sup><br>(%) | Total protein content<br>(%) |
|---------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------|
| 1       | 20                        | 80                        | 0                        | 58.0                         |
| 2       | 30                        | 50                        | 20                       | 54.8                         |
| 3       | 30                        | 30                        | 40                       | 47.6                         |

<sup>(1)</sup> แป้งสาลี

ตารางที่ 3 ปริมาณส่วนผสม และ โปรตีนทั้งหมดในวัตถุดิบสำหรับแปรรูปของเนื้อเทียมที่มี  
ส่วนผสมของกลูเตนสาลี สตาร์ชสาลี และแป้งสาลี

| Formula | DSF | SPI | WG <sup>(1)</sup><br>(%) | WS <sup>(2)</sup><br>(%) | WF | Total protein content<br>(%) |
|---------|-----|-----|--------------------------|--------------------------|----|------------------------------|
| 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                         |

<sup>(1)</sup> โปรตีนกลูเตนสาลี

<sup>(2)</sup> สตาร์ชสาลี

ตารางที่ 4 ปริมาณส่วนผสม โปรตีน และไขมันในวัตถุดิบสำหรับแปรรูปเนื้อเทียมที่มี  
ส่วนผสมของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์

| Formula | SPI | WF | DSF | FSF <sup>(1)</sup><br>(%) | Protein<br>content(%) | Lipid content<br>(%) |
|---------|-----|----|-----|---------------------------|-----------------------|----------------------|
| 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                |

<sup>(1)</sup> แป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม

## 2. วิธีการทดลอง

### 2.1. การวิเคราะห์หองค์ประกอบ

ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากถั่วเหลือง แป้งถั่วเหลืองพองไขมัน โปรตีนถั่วเหลืองสกัด แป้งสาลี และ แป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม ได้แก่ ปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เยื่อใยและไขมัน ตามวิธีของ AOAC (1995)

### 2.2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของกากถั่วเหลือง

2.2.1 ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตด้วยตาเปล่า ได้แก่ ขนาดอนุภาค สี และความสะอาด โดยให้

- คะแนนของขนาดอนุภาค 5 หมายถึง ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด และ 1 หมายถึง ขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุด
- คะแนนของสี 5 หมายถึง สีเหลืองเข้มที่สุด และ 1 หมายถึง สีเหลืองอ่อนที่สุด
- คะแนนของความสะอาด 5 หมายถึง มีเศษผงปะปนน้อยที่สุด และ 1 หมายถึง มีเศษผงปะปนมากที่สุด

2.2.2 ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย เรียงลำดับตะแกรงตาม mesh number จากน้อยไปหามาก ซึ่งนำหนักที่แน่นอนของกากถั่วเหลือง เปิดเครื่องเขย่า จับเวลา 15 นาที แล้วจึงแยกตัวอย่างที่ค้างอยู่ในแต่ละตะแกรงไปชั่งน้ำหนัก และคำนวณปริมาณของอนุภาคที่ขนาดต่างๆ ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{mass fraction (\%)} = \frac{\text{weight of particles}}{\text{total weight of particles}} \times 100$$

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

2.2.4 ดัชนีความสามารถในการละลายของไนโตรเจน (nitrogen solubility index) ตามวิธีการของ AACC (1999) บดตัวอย่างให้มีขนาดเล็กและร่อนด้วยตะแกรงขนาด 100 mesh ซึ่งตัวอย่างหนัก 5 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 400 มล. เติมน้ำ 200 มล. ลงไป คนด้วยแท่งแก้วให้ตัวอย่างกระจายตัวและล้างส่วนที่ติดแท่งแก้วคนออกให้หมด คนตัวอย่างที่ 120 rpm ด้วยแท่งแม่เหล็ก ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 30 องศาเซลเซียสแล้วนำไปเติมในขวดปรับปริมาตรขนาด 250 มล. และปรับปริมาตรให้ถึงขีดบอกระดับ เขย่าผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 2-3 นาที แล้วเทใส่หลอดสำหรับปั่นเหวี่ยง 40 มล. ปั่นเหวี่ยง ที่ 1500 rpm เป็นเวลา 10 นาที เทแยก supernatant ผ่าน glass wool ที่บรรจุไว้บนขวดรูปชมพู่ และเปิดส่วนใส 10 มล. ไปวิเคราะห์ปริมาณ โปรตีน

การคำนวณ

$$\% \text{ water soluble N} = \frac{(B-S) \times N \times 0.14 \times 100}{\text{weight of sample}}$$

โดย B = ml. Alkaline back-titration of blank,

S = ml. Alkaline back- titration of sample,

N = normality of alkaline

$$\% \text{ nitrogen solubility index (NSI)} = \frac{\% \text{ water soluble N} \times 100}{\% \text{ total N}}$$

### 2.3 การตรวจสอบสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด

3.1 ดัชนีความสามารถในการละลายของไนโตรเจน ตามวิธีการ 2.2.4 ข้างต้น

3.2 ความสามารถในการละลาย (solubility) ละลายตัวอย่างในน้ำกลั่นที่ความเข้มข้น 1% คนด้วยแท่งแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชม. นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 12100 g เป็นเวลา 20 นาที และนำส่วนใสไปหาปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ด้วย biuret method และคำนวณความสามารถในการละลายของโปรตีน ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\text{protein solubility (\%)} = \frac{\text{soluble protein} \times 100}{\text{total protein}}$$

โดยใช้ protein factor factor เท่ากับ 6.25

3.3 ความหนืดของเจล (gel viscosity) วัดสมบัติของเจลที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ละลายในน้ำกลั่น ให้ความร้อน 80 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ทำให้เย็นตลอดคืนที่ 4 องศาเซลเซียส นำมาตั้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้องจนตัวอย่างมีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส วัดความหนืดของเจลด้วย Brookfield viscometer ด้วย Helipath stand และใช้ T spindle ทำที่ 5 rpm ได้ค่าในหน่วย centipoises ซึ่งคำนวณค่าตามสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ความหนืด (centipoises)} = \text{Dial reading} \times \text{factor}$$

### 2.4 การทำเอกซ்தุรชันเนื้อเทียม

#### 2.4.1 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

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

#### 2.4.2 การแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ்தุรชัน

นำวัตถุดิบที่ผ่านการผสมแล้วมาป้อนเข้าเครื่องเอกซ்தุรเตอร์แบบสกรูคู่ชนิดที่หมุนตามกัน (APV Baker MPF 19:25, corotating intermeshing twin screw extruder, APV Baker,



Peterborough, England) โดยเครื่องเอกซเรย์เทอร์ประกอบด้วยสกรูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร และมีอัตราส่วนความยาวเทียบกันเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (L/D ratio) เท่ากับ 25:1 โดยควบคุมอุณหภูมิของบารเรลตลอดความยาวในช่วงที่ 1 ถึง 4 ไว้ที่ 60, 90, 140 และ 160 องศาเซลเซียส บารเรลที่ส่วนของหัวแบบ (die plate) มีรูเปิดวงกลม (die hole) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตรซึ่งเป็นทางออกของผลิตภัณฑ์ ในกระบวนการแปรรูปใช้ความเร็วรอบสกรู 250 รอบต่อนาที ป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เครื่องเอกซเรย์เทอร์ผ่านทางถังใส่วัตถุดิบที่ได้ถังมีเกลียวสกรูเป็นตัวป้อนวัตถุดิบแบบปริมาตร (K-Tron International, Piman, NJ, USA) ด้วยอัตราคงที่ 65 กรัมต่อนาที มีปั๊มน้ำชนิดที่มีการบีบตัวส่งน้ำเป็นระยะๆ (peristaltic pump) ที่ส่งน้ำเข้าไปผสมกับวัตถุดิบภายในบารเรลให้วัตถุดิบมีความชื้นเป็น 30 เปอร์เซ็นต์ ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่ได้นำไปอบแห้งในตู้อบร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จนกระทั่งผลิตภัณฑ์มีความชื้นไม่เกิน 9 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และนำไปเก็บไว้ในห้องเย็นก่อนที่นำไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและทางเคมี

#### 2.4.3 การศึกษาผลของสภาวะการเอกซเรย์ต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่

ศึกษาตัวแปรของสภาวะการเอกซเรย์ซึ่งมีต่อลักษณะของเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของ FSF 20 เปอร์เซ็นต์ โดยนำวัตถุดิบจากหัวข้อ 1.2.7 มาใช้ในการแปรรูป และศึกษาตัวแปรของการเอกซเรย์ 3 ตัวแปร ได้แก่ ความเร็วรอบสกรู คือ 250 และ 350 รอบต่อนาที ความชื้น 3 ระดับ คือ 25, 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิของบารเรลส่วนสุดท้าย 2 ระดับ คือ 160 และ 170 องศาเซลเซียส โดยตั้งอุณหภูมิของบารเรล 3 ส่วนแรกไว้ที่ 60, 90 และ 140 องศาเซลเซียส สำหรับการตั้งอุณหภูมิของบารเรลส่วนสุดท้ายเป็น 160 องศาเซลเซียส และ ตั้งอุณหภูมิของบารเรล 3 ส่วนแรกไว้ที่ 60, 90 และ 150 องศาเซลเซียส สำหรับการตั้งอุณหภูมิของบารเรลส่วนสุดท้ายเป็น 170 องศาเซลเซียส ป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เครื่องเอกซเรย์เทอร์ด้วยอัตราคงที่ 65 กรัมต่อนาที นอกจากนี้ ส่วนประกอบและกลไกการทำงานของเครื่องเอกซเรย์เทอร์ รวมทั้งขั้นตอนการเก็บรักษาเนื้อเทียมหลังแปรรูปให้ดำเนินการแปรรูปด้วยการเอกซเรย์ในหัวข้อ 2.4.2

#### 2.4.4 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การศึกษาผลของส่วนผสมต่อลักษณะของเนื้อเทียมมีการวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (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 ส่วนการศึกษาผลของสภาวะการเอกซเรย์ซึ่งมีการจัดวางทรีดเมนต์แบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) ที่ระดับ  $3 \times 2 \times 2$  โดยใช้แผนการทดลองแบบ CRD วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลด้วย ANOVA เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลด้วยวิธี DMRT โดยใช้โปรแกรม Statistical Analysis System (SAS) version 9.0 และนำค่าที่วัดได้มาสร้างความสัมพันธ์กับตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา โดยการ

วิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุ (Multiple Regression) ด้วยโปรแกรม SPSS (version 9.0) และพิจารณาค่า coefficient of determination ( $R^2$ ) เมื่อมีค่าสูงจึงจะนำสมการมาใช้ในการสร้างกราฟ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป STATISTICA (version 5.0) เพื่อแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของสภาวะการแปรรูปที่เลือกศึกษากับผลตอบสนองที่วัดได้

## 2.5 การตรวจสอบลักษณะของผลิตภัณฑ์

### 2.5.1 ลักษณะทางกายภาพ

#### 2.5.1.1 ลักษณะเนื้อสัมผัส

การตรวจเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (TA-XT2 Texture Analyzer; Stable Micro Systems, United Kingdom) โดยตัดชิ้นของเนื้อเทียมให้มีความยาว  $3 \pm 0.2$  เซนติเมตร นำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที นำขึ้นจากน้ำ และวัดความชื้นด้วยเครื่องวิเคราะห์ความชื้น (MA40 Moisture Analyzer, Sartorius, Germany) ให้ตัวอย่างมีความชื้น 80 เปอร์เซ็นต์ และเก็บไว้ในภาชนะปิด วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างก่อนนำไปวัดค่าแรงตัด (cutting force) โดยวางตัวอย่างบนแท่นวางตัวอย่างและตัดตัวอย่างให้ขาดออกจากกันด้วยใบมีดแบบ Warner-Bratzler shear โดยกำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่ของใบมีด 2 มิลลิเมตรต่อวินาที เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสจะบันทึกค่าแรงที่ใบมีดใช้ในการตัดตัวอย่างให้ขาดออกจากกัน ทดสอบตัวอย่างแต่ละชนิด 15 ซ้ำ แล้วนำมาคำนวณค่าความเครียดดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{ความเครียด} = \frac{\text{แรงตัดตัวอย่าง}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง}}$$

#### 2.5.1.2 ลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัส (textural appearance)

ทดสอบลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม ด้วยวิธี Quantitative Descriptive Analysis โดยตัดชิ้นของเนื้อเทียมให้มีความยาว  $5 \pm 0.2$  เซนติเมตร นำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที นำขึ้นมาผึ่งให้สะเด็ดน้ำและเก็บไว้ในภาชนะปิด เตรียมตัวอย่างใส่ภาชนะ แล้วนำไปให้ผู้ทดสอบทำการฉีกตัวอย่างเนื้อเทียมออกตามแนวยาว แล้วสังเกตลักษณะการฉีกได้และการจัดเรียงตัวของเส้นใยที่ปรากฏภายในชิ้นเนื้อเทียม ซึ่งมีผลิตภัณฑ์ตัวอย่างจากห้องตลาดเป็นตัวแทน โดยให้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนมาแล้ว 10-11 คน และทำซ้ำ 3 ครั้ง

#### 2.5.1.3 อัตราการขยายตัว (expansion ratio)

วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างและรูเปิดที่หัวแบบ แล้วคำนวณอัตราการขยายตัวของผลิตภัณฑ์เป็นค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 20 ตัวอย่าง คำนวณค่าอัตราการขยายตัวตามสมการต่อไปนี้

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

#### 2.5.1.4 ความหนาแน่นจำเพาะ (piece density)

ตรวจสอบความหนาแน่นของตัวอย่างเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม ด้วยวิธีการแทนที่ด้วยทราย โดยการชั่งน้ำหนักบีกเกอร์พลาสติก ( $W_1$ ) ที่ทราบปริมาตรแน่นอน ( $V$ ) เติมทรายลงในภาชนะให้ล้นแล้วเคาะบีกเกอร์ 20 ครั้งและใช้ไม้บรรทัดควาดทรายตามแนวปากบีกเกอร์ออกและบันทึกน้ำหนักของบีกเกอร์ที่มีทราย ( $W_2$ ) เติมทรายลงในภาชนะส่วนหนึ่ง สุ่มขึ้นตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ( $W_3$ ) ใส่ลงไปในภาชนะ เติมทรายลงไปให้ล้นบีกเกอร์แล้วเคาะภาชนะ 20 ครั้ง และใช้ไม้บรรทัดควาดทรายตามแนวขอบบนของบีกเกอร์ออก บันทึกน้ำหนักของบีกเกอร์ที่มีตัวอย่างและทรายไว้ ( $W_4$ ) ทำซ้ำ 3 ครั้ง คำนวณตามสมการดังต่อไปนี้

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

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

#### 2.5.1.5 สี (color)

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

### 2.5.2 สมบัติเชิงหน้าที่

#### 2.5.2.1 ความสามารถในการกักเก็บน้ำ (water holding capacity)

วัดความสามารถในการกักเก็บน้ำของเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม ตามวิธีการของ Lin และคณะ (2002) โดยนำตัวอย่างหนัก 15 กรัม ( $W_a$ ) ใส่บีกเกอร์ไปแช่น้ำแล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำมาเททิ้งบนตะแกรงเป็นเวลา 5 นาทีให้สะเด็ดน้ำ ชั่งน้ำหนัก ( $W_b$ ) คำนวณค่าดังสมการต่อไปนี้

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

### 2.5.2.2 ดัชนีความสมบูรณ์ของโครงสร้าง(structure integrity index) (Harper, 1981)

วัดดัชนีความสมบูรณ์ของเนื้อเยื่อที่เติมแป้งสาลิ และเนื้อเยื่อที่เติมแป้งถั่วเหลือง ไขมันเต็ม การวัดดัชนีความสมบูรณ์ของโครงสร้าง (structure integrity index) (Harper, 1981) ของเนื้อเยื่อ โดยนำตัวอย่างบดด้วยโถปั่นผสม (blender) เป็นระยะเวลา 1 นาที แล้วมาร้อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 20 mesh นำส่วนที่ค้างอยู่บนตะแกรง มาแช่น้ำเป็นระยะเวลา 5 นาที ผึ่งให้สะเด็ดน้ำ แล้วนำไปให้ความร้อนในภาชนะปิด ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส 15 นาที (autoclave) แล้วจึงนำภาชนะที่บรรจุตัวอย่างมาแช่น้ำเพื่อลดอุณหภูมิลงจนตัวอย่างมีอุณหภูมิห้องและนำตัวอย่างออกมาบดด้วยโถปั่นผสม นำส่วนที่ผ่านการบด 100 กรัม มาวางบนตะแกรงขนาด 20 mesh ฉีดล้างด้วยน้ำเย็น 1 นาที เขย่าให้น้ำส่วนที่เกินไหลออกไปพร้อมทั้งซับน้ำด้วยผ้าให้แห้ง ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างส่วนที่ค้างอยู่บนตะแกรง คำนวณตามสมการต่อไปนี้

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

### 2.5.3 ลักษณะโครงสร้างภายใน (microstructure)

#### 2.5.3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

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

#### 2.5.3.2 กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ

เตรียมตัวอย่างหลังอบแห้ง โดยตัดเนื้อเยื่อออกเป็นชิ้นบาง ๆ ขนาดกว้าง 0.4 เซนติเมตร ยาว 0.6 เซนติเมตร และหนา 0.2 เซนติเมตร แล้วส่องดูโครงสร้างภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (SZ3060, Olympus stereo microscope) และถ่ายภาพตัวอย่างตามขวาง และภาพถ่ายตามยาวที่กำลังขยาย 12 เท่า

### 2.5.4 การตรวจสอบลักษณะทางเคมี

#### 2.5.4.1 ความสามารถในการละลายของโปรตีน (protein solubility)

วิเคราะห์ความสามารถในการละลายของโปรตีน จากวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ผ่านการสกัดโปรตีนด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 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 และ เมอแคปโทเอทานอล 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 ซึ่งน้ำหนักตัวอย่าง 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

#### 2.5.4.2 ความเข้มข้นของโปรตีนด้วยวิธี Lowry method

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

#### 2.5.4.3 ปริมาณหมู่ซัลไฮดริลอิสระ (free sulfhydryl group)

ตรวจวัดปริมาณซัลไฮดริลของเนื้อเยื่อที่เติมโพแทสเซียมโบรเมท (Li and Lee, 1996a; Adachi, Chunying and Utsumi, 2004) ผสมสารละลายตัวอย่างที่มีโปรตีนความเข้มข้น 4 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งสกัดด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มียูเรียความเข้มข้น 8 โมลาร์ และโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์ pH 7.6 ปริมาณ 1 มิลลิลิตร กับสารละลายเอลแมน (Ellman's reagent: DTNB) ซึ่งทำละลายในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล ที่ความเข้มข้น 4 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ที่ pH 7.6 ปริมาณ 100 ไมโครลิตร นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 412 นาโนเมตรคำนวณปริมาณหมู่ซัลไฮดริล โดยใช้ค่าโมลาร์ แอบซอร์บติวิตี (molar absorptivity:  $\epsilon$ )  $13600 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  คำนวณปริมาณซัลไฮดริลในหน่วย ไมโครโมล ต่อ กรัมโปรตีน

### บทที่ 3

#### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

#### การวิเคราะห์หาสารไอโซฟลาโวนส์ในถั่วเหลืองและผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลือง

จากการทำ standard curve ของสาร standard isoflavone 4 ชนิด ได้ผลดังตารางที่ 6 โดยพบว่า retention time ของ daidzin คือ 8.708 นาที และค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9982 ส่วน retention time ของ genistin คือ 13.855 นาที และค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9990 สำหรับ retention time ของ daidzein คือ 22.338 นาที และค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9985 retention time ของ genistein มีค่า 30.857 นาที และค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9964 ตามลำดับ ส่วนค่าความเข้มข้นที่ระดับต่างๆ และ % recovery ของสาร standard isoflavone ทั้ง 4 ชนิด แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 5 ปริมาณโปรตีนและไขมันของถั่วเหลืองสายพันธุ์ต่างๆ

| สายพันธุ์            | โปรตีน (%) | ไขมัน (%) |
|----------------------|------------|-----------|
| สจ.1                 | 37.00      | 18.40     |
| สจ.2                 | 39.10      | 20.10     |
| สจ.4                 | 43.60      | 20.10     |
| สจ.5                 | 41.80      | 18.70     |
| สุโขทัย1 (สท.1)      | 34.40      | 21.20     |
| สุโขทัย 2 (สท.2)     | 39.00      | 21.00     |
| เชียงใหม่ 2 (ชม.2)   | 34.60      | 34.60     |
| เชียงใหม่ 60 (ชม.60) | 39.40      | 21.30     |
| นครสวรรค์1 (นว.1)    | 36.00      | 21.20     |

ที่มา: เอกสารวิชาการ การแปรรูปผลิตภัณฑ์ชีวไร่ กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

ตารางที่ 6 Retention time และ  $R^2$  ของ standard isoflavone 4 ชนิด

| Isoflavone | Retention time<br>(min) | Concentration<br>[ $\mu\text{g/ml}$ ] | Linear range<br>( $R^2$ ) |
|------------|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| Daidzin    | 8.708                   | 2.0221 – 32.0382                      | 0.9982                    |
| Genistin   | 13.855                  | 1.7445 – 31.7665                      | 0.9990                    |
| Daidzein   | 22.338                  | 2.3878 – 32.0459                      | 0.9985                    |
| Genistein  | 30.857                  | 1.6282 – 31.7409                      | 0.9964                    |

หมายเหตุ: ข้อมูลข้างต้นได้จากการวัด 8 ครั้ง

ตารางที่ 7 ความเข้มข้นและ % recovery ของ standard isoflavone 4 ชนิด

| Isoflavone | Concentration<br>[ $\mu\text{g/ml}$ ] | Recovery<br>(%) |
|------------|---------------------------------------|-----------------|
| Daidzin    | 2.0021                                | 101.10          |
|            | 4.2798                                | 106.99          |
|            | 9.0059                                | 112.57          |
|            | 17.6973                               | 110.61          |
|            | 32.0382                               | 100.12          |
| Genistin   | 1.7445                                | 87.23           |
|            | 3.6786                                | 91.97           |
|            | 6.9983                                | 87.48           |
|            | 14.5475                               | 90.92           |
|            | 31.7665                               | 99.27           |
| Daidzein   | 2.3878                                | 119.39          |
|            | 4.0913                                | 102.28          |
|            | 8.7529                                | 109.41          |
|            | 17.7159                               | 110.72          |
|            | 32.0459                               | 100.14          |
| Genistein  | 1.6282                                | 81.41           |
|            | 4.4523                                | 111.31          |
|            | 8.6898                                | 108.62          |
|            | 18.2264                               | 113.91          |
|            | 31.7409                               | 99.19           |

หมายเหตุ : ข้อมูลข้างต้นได้จากการวัด 8 ครั้ง

ปริมาณสารไอโซฟลาโวนส์ทั้งหมดที่พบในเมล็ดถั่วเหลืองสายพันธุ์ต่างๆ มีค่าอยู่ในช่วง 1,000 - 5,000  $\mu\text{g/g}$  (db) โดยมีปริมาณสูงสุดในถั่วเหลืองสายพันธุ์สุโขทัย 1 (สท.1) และมีปริมาณต่ำสุดในถั่วเหลืองสายพันธุ์ สจ.5 แสดงดังตารางที่ 8 ซึ่งสารไอโซฟลาโวนส์ส่วนใหญ่ที่พบอยู่ในรูปของ  $\beta$ -glucoside คือ daidzin และ genistin ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Wang and Murphy (1994b) ที่ศึกษาปริมาณสารไอโซฟลาโวนส์ในถั่วเหลืองสายพันธุ์ต่างๆ และพบว่าปริมาณทั้งหมดอยู่ในช่วง 1,200 - 4,200  $\mu\text{g/g}$  โดยสารไอโซฟลาโวนส์ส่วนใหญ่ที่พบเป็น daidzin และ genistin เมื่อพิจารณาถึงสายพันธุ์

ของถั่วเหลืองพบว่าสารไอโซฟลาโวนส์มีปริมาณมากน้อยแตกต่างกันออกไปตามสายพันธุ์ ซึ่งถั่วเหลืองแต่ละสายพันธุ์นั้นมีแหล่งเพาะปลูกแตกต่างกันออกไป จึงทำให้มีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันบ้างในด้านปริมาณของโปรตีนและไขมัน โดยสาเหตุดังกล่าวน่าจะส่งผลถึงปริมาณสารไอโซฟลาโวนส์ที่ตรวจพบ โดยจะเห็นว่าองค์ประกอบทางเคมีของถั่วเหลืองสายพันธุ์สุโขทัย (สท.1) ที่รายงานโดยกรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2545) ที่แสดงคังตารางที่ 5 มีปริมาณโปรตีน 34.40% ซึ่งอยู่ในระดับต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับสายพันธุ์อื่นๆ และไขมัน 21.20% ซึ่งอยู่ในระดับที่ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับสายพันธุ์อื่นๆ สำหรับถั่วเหลืองสายพันธุ์ สจ.5 นั้นมีองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นโปรตีนอยู่ปริมาณสูงและไขมันปริมาณต่ำ ส่วนถั่วชนิดอื่นๆ ตรวจไม่พบสารไอโซฟลาโวนส์

ตารางที่ 8 ปริมาณสารไอโซฟลาโวนส์ ในถั่วชนิดต่างๆ

| Sample                 | Daidzin<br>( $\mu\text{g/g}$ ) <sup>(1)</sup> | Genistin<br>( $\mu\text{g/g}$ ) | Daidzein<br>( $\mu\text{g/g}$ ) | Genistein<br>( $\mu\text{g/g}$ ) | Total<br>( $\mu\text{g/g}$ ) |
|------------------------|---|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| ถั่วเหลืองพันธุ์ สจ.1  | 2,303.98                                      | 1,207.77                        | 9.19                            | 10.41                            | 3,531.35                     |
| ถั่วเหลืองพันธุ์ สจ.2  | 1,601.48                                      | 863.88                          | 3.98                            | 8.78                             | 2,487.12                     |
| ถั่วเหลืองพันธุ์ สจ.4  | 1,987.94                                      | 1,160.69                        | 1.16                            | 21.87                            | 3,171.66                     |
| ถั่วเหลืองพันธุ์ สจ.5  | 666.11  | 270.35                          | ND                              | 32.53                            | 968.99                       |
| ถั่วเหลืองพันธุ์ สท.1  | 3,949.54                                      | 1,633.42                        | 14.01                           | 28.34                            | 5,625.31                     |
| ถั่วเหลืองพันธุ์ สท.2  | 2,353.37                                      | 1,083.42                        | 12.11                           | 16.79                            | 3,465.69                     |
| ถั่วเหลืองพันธุ์ ชม.2  | 3,136.69                                      | 1,629.36                        | 7.78                            | 11.08                            | 4,784.91                     |
| ถั่วเหลืองพันธุ์ ชม.60 | 1,205.75                                      | 546.25                          | 0.88                            | 14.50                            | 1,767.38                     |
| ถั่วเหลืองพันธุ์ นว.1  | 2,909.97                                      | 1,337.76                        | 23.52                           | 19.25                            | 4,290.50                     |
| ถั่วเขียวพันธุ์ กพส.1  | ND  | ND                              | ND                              | ND                               | ND                           |
| ถั่วเขียวพันธุ์ กพส.2  | ND  | ND                              | ND                              | ND                               | ND                           |
| ถั่วเขียวพันธุ์ มทส.1  | ND  | ND                              | ND                              | ND                               | ND                           |
| ถั่วฝักยาวพันธุ์ มทส.1 | ND  | ND                              | ND                              | ND                               | ND                           |
| ถั่วดำตราเอราวัณเลิศ   | ND  | ND                              | ND                              | ND                               | ND                           |
| ถั่วแดงตราเอราวัณเลิศ  | ND  | ND                              | ND                              | ND                               | ND                           |
| ถั่วพุ่มพันธุ์ นางแดง  | ND  | ND                              | ND                              | ND                               | ND                           |

<sup>(1)</sup> หมายถึง  $\mu\text{g/g}$  of sample (dry basis)

ND หมายถึง not detected



สำหรับผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลือง ซึ่งได้แก่ เนื้อเทียม และโยเกิร์ตถั่วเหลืองผง ตรวจพบปริมาณสารไอโซฟลาโวนส์ในช่วง 750 – 1,500  $\mu\text{g/g}$  (db) โดยพบในเนื้อเทียมมากกว่าโยเกิร์ตถั่วเหลือง แสดงดังตารางที่ 9 และโครงสร้างของสารไอโซฟลาโวนส์ในเนื้อเทียมพบเฉพาะรูปของ  $\beta$ -glucoside คือ daidzin และ genistin ส่วนรูปของ aglycone คือ daidzein และ genistein นั้นตรวจไม่พบ ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันใช้ความร้อนค่อนข้างสูง ทำให้มีการสูญเสีย daidzein และ genistein และบางส่วนเปลี่ยนรูปไปเป็น daidzin และ genistin ดังจะเห็นได้จากปริมาณของ daidzein และ genistein ที่หายไปจากวัตถุดิบ และการเพิ่มขึ้นของ daidzin และ genistin จากวัตถุดิบ โดย Coward et al.(1994) รายงานว่าความร้อนจะเหนี่ยวนำให้เกิด ปฏิกิริยา esterification ทำให้เกิดสารไอโซฟลาโวนส์ในรูปของ glucoside ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Mahungu et al. (1999) ที่พบว่าเอ็กซ์ทรูคตที่ประกอบด้วย 20% soy protein concentrate และ 80% commeal มีปริมาณสารไอโซฟลาโวนส์ในรูปของ glucoside มากกว่า aglycone นอกจากนี้ Barnes et al. (1999) รายงานว่าการให้ความร้อน 100°C จะได้สารไอโซฟลาโวนส์ในรูปของ glucoside เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารไอโซฟลาโวนส์ระหว่างวัตถุดิบที่ใช้ทำเนื้อเทียมกับเนื้อเทียมที่ผ่านกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน พบว่าในเนื้อเทียมมีปริมาณสารไอโซฟลาโวนส์ทั้งหมดน้อยกว่าในวัตถุดิบ อาจเนื่องมาจากไอโซฟลาโวนส์บางส่วนถูกทำลายไป ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Mahungu et al. (1999) ที่พบว่าเอ็กซ์ทรูคตซึ่งผ่านกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแล้วมีปริมาณสารไอโซฟลาโวนส์ทั้งหมดน้อยกว่าในวัตถุดิบเริ่มต้น

สำหรับโครงสร้างของสารไอโซฟลาโวนส์ที่พบในโยเกิร์ตถั่วเหลือง อยู่ในรูปของทั้ง  $\beta$ -glucoside และ aglycone คือ daidzin, genistin, daidzein และ genistein โดยมีปริมาณของสารไอโซฟลาโวนส์ในรูปของ  $\beta$ -glucoside มากกว่า aglycone แต่เมื่อเปรียบเทียบกับเมล็ดถั่วเหลืองพบว่าสารไอโซฟลาโวนส์ในรูปของ aglycone มีสัดส่วนปริมาณที่มากขึ้น โดยพบว่า genistein มีปริมาณมากกว่า daidzein ด้วยซึ่งไม่เหมือนกับที่ตรวจพบในถั่วเหลือง ทั้งนี้อาจเกิดจากจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทำโยเกิร์ตสามารถตัดพันธะ glucosidic ของโครงสร้างในรูป glucoside ให้กลายเป็นโครงสร้างในรูปของ aglycone ได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Fukutake et al.(1996) ที่พบว่าในผลิตภัณฑ์ถั่วเหลืองที่ผ่านการหมักมีปริมาณ genistein สูงกว่าในถั่วเหลือง นมถั่วเหลือง และเต้าหู้

ตารางที่ 9 ปริมาณสารไอโซฟลาโวนส์ ในวัตถุดิบที่ใช้ทำเนื้อเทียม, เนื้อเทียมและ โยเกิร์ตถั่วเหลืองผง

| Sample                     | Daidzin<br>( $\mu\text{g/g}$ ) <sup>(1)</sup> | Genistin<br>( $\mu\text{g/g}$ ) | Daidzein<br>( $\mu\text{g/g}$ ) | Genistein<br>( $\mu\text{g/g}$ ) | Total<br>( $\mu\text{g/g}$ ) |
|----------------------------|---|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| วัตถุดิบที่ใช้ทำเนื้อเทียม | 517.90  | 409.51                          | 269.32                          | 348.23                           | 1,544.96                     |
| เนื้อเทียม                 | 642.37  | 453.92                          | ND                              | ND                               | 1,096.29                     |
| โยเกิร์ตถั่วเหลืองผง       | 230.47  | 305.75                          | 51.34                           | 164.28                           | 751.84                       |

<sup>(1)</sup> หมายถึง  $\mu\text{g/g}$  of sample(dry basis) ND หมายถึง not detected

## โยเกิร์ตถั่วเหลือง

### 1. ลักษณะทางเคมีของถั่วเหลืองเต็มเมล็ด ถั่วเหลืองซีก และนมถั่วเหลือง

จากการวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีพบว่าถั่วเหลืองเต็มเมล็ดและถั่วเหลืองซีกมีองค์ประกอบทางเคมีที่ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่มีความแตกต่างอย่างชัดเจนในเรื่องของปริมาณ fiber ซึ่งเกิดจากถั่วเหลืองเต็มเมล็ดมีเปลือกหุ้มที่มีองค์ประกอบของสารพวก fiber เช่น lignin และ cellulose มากกว่าถั่วเหลืองซีก และเมื่อเปรียบเทียบลักษณะทางเคมีระหว่างถั่วเหลืองซีกและนมถั่วเหลืองซึ่งใช้อัตราส่วนถั่วเหลืองซีกแห้งต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 6 พบว่าองค์ประกอบต่างๆทางเคมีมีค่าลดลงจากถั่วเหลืองซีก โดยเฉพาะปริมาณคาร์โบไฮเดรต เนื่องจากเกิดการละลายของคาร์โบไฮเดรตส่วนที่ละลายได้ เช่น น้ำตาล ซึ่งน้ำตาลส่วนใหญ่ที่พบในถั่วเหลืองจะเป็นพวก raffinose และ starchyose จึงทำให้ในนมถั่วเหลืองมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตน้อยกว่าถั่วเหลืองซีก สำหรับปริมาณ fiber ที่ลดลง เนื่องจากมีการกำจัดเปลือกหุ้มเมล็ดออกในขั้นตอนการล้างทำความสะอาด จึงทำให้ในนมถั่วเหลืองมีปริมาณ fiber ต่ำ ส่วนปริมาณโปรตีนและไขมันในนมถั่วเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้นจากปริมาณที่พบในถั่วเหลือง เนื่องจากโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบในถั่วเหลืองสามารถละลายได้ดีในน้ำจึงมีปริมาณเพิ่มขึ้น แสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 องค์ประกอบทางเคมีของถั่วเหลืองเต็มเมล็ด (whole soybean) ถั่วเหลืองซีก (Split soybean) และนมถั่วเหลือง (soymilk)

| Component                                | Whole soybean     | Split soybean | Soymilk |
|--|-------------------|---------------|---------|
| Moisture (%)                             | 9.78              | 7.58          | 91.64   |
| Total solid (%)                          | 90.22             | 92.42         | 8.36    |
| Total soluble solid ( <sup>o</sup> Brix) | ND <sup>(1)</sup> | ND            | 7.92    |
| Ash (%db)                                | 5.89              | 6.01          | 3.00    |
| Protein (%db)                            | 43.21             | 42.86         | 55.38   |
| Fat (%db)                                | 17.16             | 17.36         | 19.77   |
| Fiber (%db)                              | 6.14              | 5.53          | 2.51    |
| Carbohydrate (%db)                       | 30.08             | 30.89         | 19.82   |

<sup>(1)</sup> ND หมายถึง ไม่ได้ตรวจวัด

## 2. นมถั่วเหลืองผงที่เตรียมจากวิธี Spray drying และ Freeze drying

การเตรียมนมถั่วเหลืองผงสำหรับการเพิ่มปริมาณของแข็งในนมถั่วเหลืองที่จะใช้เตรียมโยเกิร์ตถั่วเหลืองนั้น ได้เปรียบเทียบสมบัติของนมถั่วเหลืองผงที่ใช้วิธีการเตรียมโดย spray drying และ freeze drying ซึ่งสมบัติต่างๆ แสดงดังตารางที่ 11 เห็นได้ว่า นมถั่วเหลืองผงที่เตรียมจากวิธีการ spray drying มีความสามารถในการละลายดีกว่า มีโปรตีนที่ละลายได้มากกว่า ซึ่งเกี่ยวข้องกับ ค่า Nitrogen solubility index ที่มีมากกว่า แสดงว่าโปรตีนเสถียรภาพน้อยกว่าวิธีการ freeze drying ซึ่งอาจเป็นเพราะวิธีการเตรียมแบบ freeze drying นั้น ใช้วิธีการแช่แข็งแบบช้าในตู้แช่  $-20^{\circ}\text{C}$  จึงทำให้โปรตีนเกิดการเสถียรภาพในระหว่างการแช่แข็ง จึงทำให้คุณสมบัติการละลายของโปรตีนด้อยกว่าแบบ spray drying ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีการ spray drying ในการเตรียมนมถั่วเหลืองผงในงานชิ้นต่อไป ซึ่งเมื่อเลือกวิธีการเตรียมนมถั่วเหลืองผงได้แล้ว ได้ศึกษาสภาวะการ spray drying นมถั่วเหลืองที่เหมาะสม โดยใช้ลักษณะปรากฏของนมถั่วเหลืองผงที่ออกมาจากหัว nozzle และปริมาณ yield เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ โดยศึกษาทั้งหมด 6 สภาวะ ดังตารางที่ 12 ซึ่งจะเห็นว่านมถั่วเหลืองผงที่เตรียมจากสภาวะที่ 3 มีปริมาณนมถั่วเหลืองผงสูงสุด คือ 52.90% รองลงมา คือ สภาวะที่ 1 36.45% และ สภาวะที่ 2 13.98% ตามลำดับ ส่วนสภาวะที่ 4-6 ไม่สามารถ spray ให้เป็นผงได้ ดังนั้นจะเห็นว่า การ spray drying นมถั่วเหลืองไม่สามารถกระทำได้ที่ปริมาณ total solid สูงๆ ได้ โดยที่สภาวะที่ 3 นั้นนมถั่วเหลืองที่ได้มีลักษณะเป็นผงละเอียด ไม่เกาะกันเป็นเส้น ทั้งที่หัว nozzle และหลังจากออกจากหัว nozzle แล้ว ดังนั้นจึงเลือกสภาวะที่ 3 สำหรับใช้เตรียมนมถั่วเหลืองผง คือ ใช้ Total solid of soymilk ประมาณ 9-10% Air inlet temperature  $115^{\circ}\text{C}$  และ outlet temperature  $75 \pm 1^{\circ}\text{C}$

ตารางที่ 11 สมบัติของนมถั่วเหลืองผงที่เตรียมจากวิธี Spray drying และ Freeze drying

| Component                     | Soymilk powder from<br>spray drying | Soymilk powder from<br>freeze drying |
|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Soluble solid (%)             | 35.58                               | 29.84                                |
| Non soluble solid (%)         | 64.42                               | 70.16                                |
| Protein solubility (%)        | 19.75                               | 14.04                                |
| Nitrogen solubility index (%) | 60.26                               | 25.97                                |

ตารางที่ 12 ผลการเตรียมนมถั่วเหลืองผงโดยวิธี Spray drying

| สภาวะ | Total solid of soymilk (%) | Air Inlet temperature (°C) | Outlet temperature (°C) | ลักษณะนมถั่วเหลืองผง                 | Yield (%) |
|-------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------|
| 1     | 9.70                       | 115                        | 75.9                    | เป็นผงละเอียดไม่เป็นเส้นเกาะติดกัน   | 36.45     |
| 2     | 10.18                      | 110                        | 90.0                    | เป็นเส้นเกาะติดกัน และเป็นผงเล็กน้อย | 13.98     |
| 3     | 10.98                      | 115                        | 75.8                    | เป็นผงละเอียดและเป็นเส้นเล็กน้อย     | 52.90     |
| 4     | 27.28                      | 115                        | 77.2                    | เป็นเส้นเกาะติดกันและเป็นผงเล็กน้อย  | -         |
| 5     | 30.18                      | 120                        | 90.0                    | เป็นเส้นเกาะติดกัน                   | -         |
| 6     | 30.18                      | 130                        | 90.0                    | เป็นเส้นเกาะติดกัน                   | -         |

### 3. การคัดเลือกชนิดของไฮโดรคอลลอยด์

คุณลักษณะต่างๆ ของโยเกิร์ตถั่วเหลืองที่มีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภคส่วนใหญ่ คือ กลิ่นรส เนื้อสัมผัส และการแยกชั้นของของเหลว (serum separation หรือ syneresis) ซึ่งการเกิด syneresis นี้เป็นคุณลักษณะทางกายภาพแรกๆ ที่ผู้บริโภคสามารถเห็นได้ชัดเจน ดังนั้นจึงใช้ syneresis และเนื้อสัมผัสเป็นคุณลักษณะในการคัดเลือกชนิดของไฮโดรคอลลอยด์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำโยเกิร์ตถั่วเหลือง และเนื่องจากไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้ในการศึกษารังนี้มีหลายชนิด จึงใช้ GDL แทนการใช้ starter culture เพื่อการคัดเลือกอย่างหยาบก่อน เนื่องจากเตรียมการทดลองได้ง่ายและสะดวกกว่า โดยบ่มนมถั่วเหลืองที่มีปริมาณของแข็ง 8% ที่อุณหภูมิ  $42 \pm 1^{\circ}\text{C}$  เช่นเดียวกับการใช้ starter culture แต่ใช้เวลาเพียง 5 ชั่วโมง ผลปรากฏว่าค่า pH และปริมาณกรดแลกติก (%acidity) ของตัวอย่างโยเกิร์ตถั่วเหลืองทั้งที่เติม และไม่เติมไฮโดรคอลลอยด์มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งมีค่า pH อยู่ในช่วง 3.9 - 4.2 และปริมาณกรดแลกติกระหว่าง 0.561 - 0.727% (ตารางที่ 13) ซึ่งแสดงถึงว่ามีการควบคุมสภาวะสุดท้ายของการเกิดเจลที่ใกล้เคียงกัน แต่ผลทางด้าน การเกิด syneresis มีค่าแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.01$ ) โดยแบ่งเป็น 4 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 โยเกิร์ตถั่วเหลืองที่เกิด syneresis สูง ได้แก่ โยเกิร์ตที่เติม 0.5% pectin กลุ่มที่ 2 เกิด syneresis ปานกลาง ได้แก่ โยเกิร์ตที่ไม่เติมไฮโดรคอลลอยด์ โยเกิร์ตที่เติม 0.5% locust bean gum (LBG)+ K-carrageenan(1:1) และ โยเกิร์ตที่เติม 1% modified corn starch กลุ่มที่ 3 เกิด syneresis ต่ำ ได้แก่ โยเกิร์ตที่เติม 0.5% xanthan gum โยเกิร์ตที่เติม 0.5% LBG โยเกิร์ตที่เติม 0.5% xanthan gum+LBG (0.2:1) โยเกิร์ตที่เติม 0.5% ของ xanthan gum+LBG (0.5:1) โยเกิร์ตที่เติม 0.5% xanthan gum+LBG (1:1) โยเกิร์ตที่เติม 1% modified tapioca starch และ โยเกิร์ตที่เติม 1.5% modified rice starch กลุ่มที่ 4 ไม่เกิด syneresis ได้แก่ โยเกิร์ตที่เติม 0.5% K-carrageenan ดังแสดงในตารางที่ 14 แต่เมื่อพิจารณาถึงลักษณะปรากฏด้านเนื้อสัมผัสของโยเกิร์ตถั่วเหลืองร่วมกับการเกิด syneresis กลับพบว่าโยเกิร์ตถั่วเหลืองที่เติม 0.5% K-carrageenan เกิดลักษณะเคิร์ดที่เป็นก้อน เนื้อ

สัมผัสค่อนข้างอ่อน ไม่ค่อยเนียน ส่วนโยเกิร์ตถั่วเหลืองที่เติม 0.5%LBG และ 0.5% ของ xanthan gum+LBG (0.2:1) มีลักษณะเคิร์ดที่อ่อนนุ่ม จนถึงกับเหลวเมื่อเอียงถ้วยพลาสติกที่ใส่ ส่วนโยเกิร์ตถั่วเหลืองที่เติม 0.5% ของ xanthan gum+LBG (1:1) มีลักษณะเคิร์ดที่ค่อนข้างแข็ง เนื้อสัมผัสไม่ค่อยเนียน และโยเกิร์ตถั่วเหลืองที่เติม 1.5 %Modified com starch ให้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่ไม่ค่อยเนียน สะเอียด มีลักษณะขุ่นเล็กน้อย โดย Aysel and Meral (2004) รายงานว่า LBG เหมาะสำหรับการใช้ในการทำ stirred yoghurt ซึ่งจะให้ผลดีในเรื่องการป้องกันการเกิด syneresis และการเพิ่มความหนืดเมื่อใช้ร่วมกับไฮโดรคอลลอยด์ตัวอื่น สำหรับโยเกิร์ตถั่วเหลืองที่เติม 0.5% ของ xanthan gum ให้ลักษณะเนื้อสัมผัสค่อนข้างเนียนละเอียด โยเกิร์ตถั่วเหลืองที่เติม 0.5% ของ xanthan gum+LBG (0.5:1) ให้เนื้อสัมผัสแข็งเล็กน้อยและค่อนข้างเนียน และโยเกิร์ตถั่วเหลืองที่เติม 1%Modified tapioca starch และ 1.5%Modified rice starch ให้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่คล้ายกัน คือ ค่อนข้างเนียน ละเอียด พอสมควร ดังนั้นไฮโดรคอลลอยด์ที่ผ่านการคัดเลือกสำหรับใช้ทำโยเกิร์ตถั่วเหลือง คือ 0.5% xanthan gum, 0.5% xanthan gum+LBG (0.5:1), 1% modified tapiocastarch และ 1.5% modified rice starch เนื่องจากเกิด syneresis น้อยและมีลักษณะเคิร์ดที่ไม่อ่อนและแข็งจนเกินไป

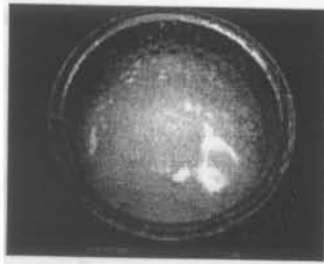
ตารางที่ 13 ชนิดของไฮโดรคอลลอยด์ต่อ pH และความเป็นกรดของโยเกิร์ตถั่วเหลือง

| Sample                       | pH   | Acidity (%) |
|------------------------------|------|-------------|
| Without hydrocolloid         | 4.02 | 0.665       |
| 0.5%Pectin                   | 3.92 | 0.727       |
| 0.5%K-carrageenan            | 4.03 | 0.713       |
| 0.5%Xanthan Gum              | 3.90 | 0.756       |
| 0.5%Locust bean gum          | 4.05 | 0.604       |
| 0.5% LBG+K-carrageenan (1:1) | 4.03 | 0.609       |
| 0.5% Xanthan gum+LBG (0.2:1) | 4.21 | 0.561       |
| 0.5% Xanthan gum+LBG (0.5:1) | 4.15 | 0.583       |
| 0.5% Xanthan gum+LBG (1:1)   | 3.99 | 0.696       |
| 1%Modified tapioca starch    | 3.98 | 0.709       |
| 1%Modified corn starch       | 3.96 | 0.710       |
| 1.5%Modified rice starch     | 4.00 | 0.701       |

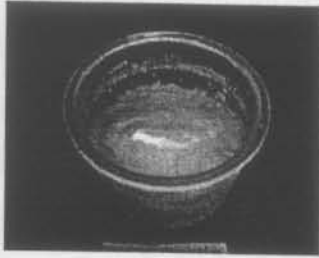
ตารางที่ 14 ลักษณะปรากฏและการแยกชั้นของของเหลวในโยเกิร์ตถั่วเหลือง 8 %solid soymilk ที่ใช้ GDL และไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ

| Sample                       | Syneresis (%)         | Appearance of soy yoghurt   |
|------------------------------|-----------------------|---|
| Without hydrocolloid         | 10.60b <sup>(1)</sup> | ผิวหน้าเรียบ เนื้อสัมผัสค่อนข้างเนียนละเอียด เป็นเนื้อเดียวกันพอสมควร                           |
| 0.5%Pectin                   | 23.00a                | ผิวหน้าไม่เรียบ เนื้อสัมผัสไม่ค่อยเนียน ละเอียด มีลักษณะขุ่น                                    |
| 0.5%K-carrageenan            | ไม่เกิด               | เกิดเคิร์ดที่มีลักษณะเป็นก้อน เนื้อสัมผัสค่อนข้างอ่อนและไม่ค่อยเนียนละเอียด                     |
| 0.5%Xanthan Gum              | 2.47c                 | ผิวหน้าเกือบเรียบ เนื้อสัมผัสค่อนข้างเนียนละเอียด มีลักษณะค่อนข้างแข็ง                          |
| 0.5%Locust bean gum          | 0.80c                 | ผิวหน้าเรียบ เนื้อสัมผัสเนียน ละเอียด อ่อนนุ่ม เกือบละเอียด                                     |
| 0.5% K-carrageenan+LBG(1:1)  | 13.80b                | ผิวหน้าเกือบเรียบ เนื้อสัมผัสไม่ค่อยเนียนละเอียดเท่าที่ควร มีลักษณะขุ่นเล็กน้อย                 |
| 0.5% Xanthan gum+LBG (0.2:1) | 0.67c                 | ผิวหน้าเรียบ เนื้อสัมผัสอ่อนนุ่ม หนืด เมื่อตักจะหนืดติดช้อน                                     |
| 0.5% Xanthan gum+LBG (0.5:1) | 1.33c                 | ผิวหน้าไม่เรียบเท่าที่ควร เนื้อสัมผัสแข็งเล็กน้อย เมื่อตักแล้วไม่หนืดติดช้อน เนื้อค่อนข้างเนียน |
| 0.5%Xanthan gum+LBG(1:1)     | 2.20c                 | ผิวหน้าเกือบเรียบ เนื้อสัมผัสแข็ง ละเอียด แต่ยังไม่เนียนเท่าที่ควร                              |
| 1%Modified tapioca starch    | 2.00c                 | ผิวหน้าเรียบ เนื้อสัมผัสค่อนข้างเนียน ละเอียดพอสมควร  |
| 1%Modified corn starch       | 11.27b                | ผิวหน้าเรียบ เนื้อสัมผัสไม่ค่อยเนียน ละเอียด มีลักษณะขุ่นเล็กน้อย                               |
| 1.5%Modified rice starch     | 4.33c                 | ผิวหน้าเรียบ เนื้อสัมผัสค่อนข้างเนียน ละเอียดพอสมควร  |

<sup>(1)</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.01)



Without hydrocolloid



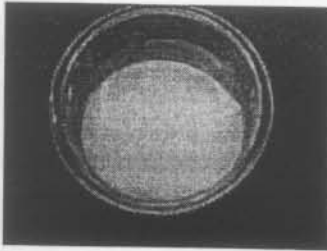
0.5% Pectin



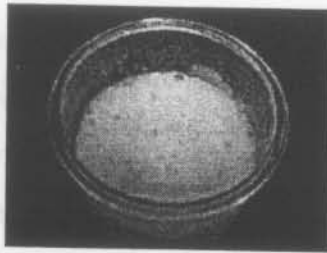
0.5% K-carrageenan



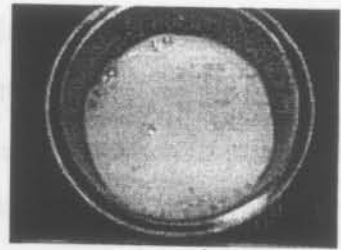
0.5% Xanthan Gum



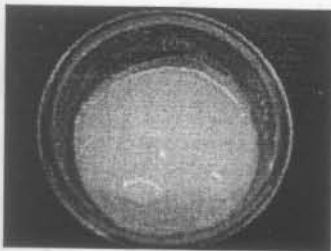
0.5% LBG



0.5% K-carrageenan + LBG (1:1)



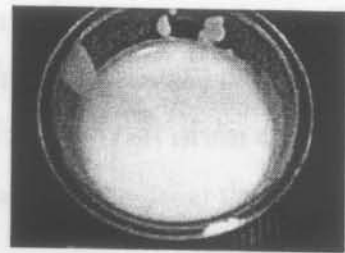
0.5% Xanthan gum + LBG (1:1)



1% Modified tapioca starch



1% Modified corn starch



1% Modified rice starch

รูปที่ 1 ลักษณะปรากฏของโยเกิร์ตถั่วเหลืองที่เตรียมจากนมถั่วเหลืองปริมาณของแข็ง 8 %solid soymilk ที่ใช้ GDL และไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ

#### 4. การศึกษาการเจริญเติบโตของ starter culture

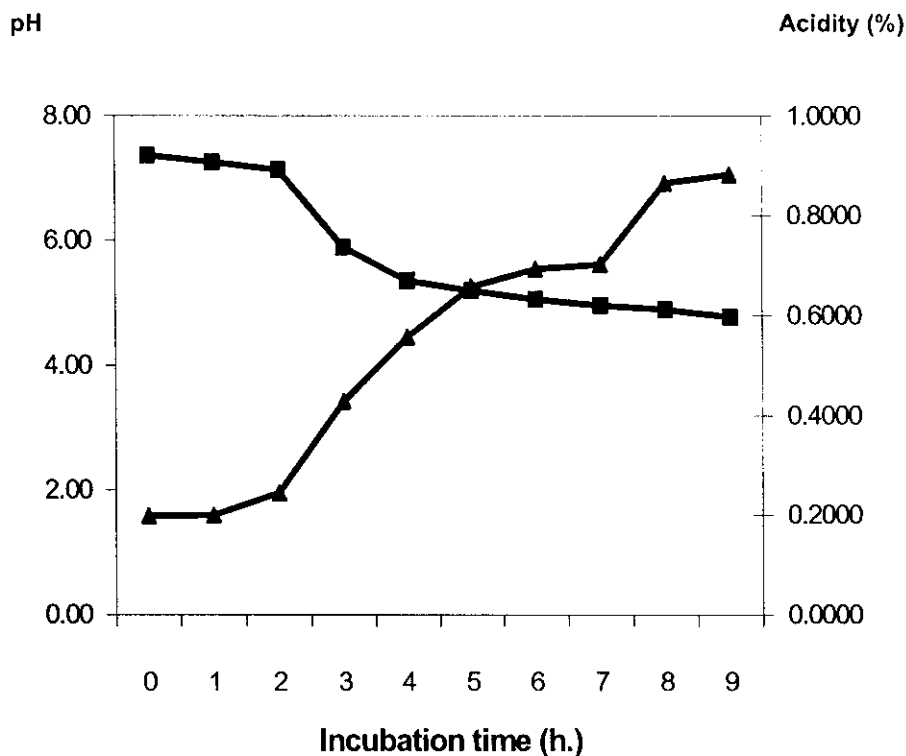
การศึกษาการเจริญเติบโตของ starter culture ในนมถั่วเหลือง ใช้ starter culture ซึ่งเป็นเชื้อผสมระหว่าง *S.thermophilus* และ *Lb.bulgaricus* ที่มีปริมาณเชื้อเริ่มต้นประมาณ  $10^7$  cfu/ml โดยนมถั่วเหลืองที่ใช้ในการศึกษานี้มีปริมาณของแข็งทั้งหมดประมาณ 8 % มีค่า pH เริ่มต้นประมาณ 7.3 และปริมาณกรดแลคติกเท่ากับ 0.2% จากรูปที่ 2 จะเห็นว่าเมื่อทำการบ่มนมถั่วเหลืองในช่วง 2 ชั่วโมงแรกนั้น pH มีการลดลงน้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณกรดแลคติกที่เพิ่มขึ้นน้อยมากเช่นกัน ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะเชื้อแลคติกอยู่ในระหว่างการปรับตัว ยังไม่มีการแบ่งตัวมากนัก ซึ่งสังเกตเห็นได้จากรูปที่ 2 แต่เมื่อหลังจากชั่วโมงที่ 2 ถึงชั่วโมงที่ 4 pH ลดลงเร็วมาก เช่นเดียวกับปริมาณกรดแลคติกที่เพิ่มขึ้นมากขึ้น อันเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของเชื้อแลคติกอย่างรวดเร็วนั่นเอง และเมื่อถึงชั่วโมงที่ 5 พบว่านมถั่วเหลืองเริ่มเกิดลักษณะเป็นเคิร์ดอ่อนๆ มีค่า pH เท่ากับ 5.2 ปริมาณกรดแลคติกเท่ากับ 0.67% และมีปริมาณเชื้อแลคติกทั้งหมด (total lactic acid bacteria) ประมาณ  $6.9 \times 10^{10}$  cfu/ml ซึ่งการที่นมถั่วเหลืองเริ่มเกิดเคิร์ดชั้นนั้น คาดว่าเนื่องมาจากองค์ประกอบในนมถั่วเหลืองที่ไม่มีน้ำตาลแลคโตสเหมือนนมวัว จุลินทรีย์ที่เป็น starter culture ทั้ง 2 ชนิด จึงไม่มีแหล่งพลังงานที่จะใช้ในการเจริญเติบโต และผลิตกรดแลคติก แต่เนื่องจากได้มีการใส่น้ำตาลซูโครสลงไป ดังนั้นจุลินทรีย์ใน starter culture จึงใช้น้ำตาลซูโครสนี้เป็นแหล่งพลังงานแทนแต่ใช้ได้ไม่ดีเท่ากับน้ำตาลแลคโตส จึงผลิตกรดแลคติกได้ช้ากว่า โดย Koca et al (2002) รายงานว่าอัตราการผลิตกรดของ starter culture ในนมถั่วเหลืองจะน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับนมวัว และการเติมน้ำตาลซูโครสปริมาณ 2% ในนมถั่วเหลือง จะช่วยกระตุ้นอัตราการผลิตกรดของ starter culture (Trindade et al., 2001)

เมื่อบ่มหลังจากชั่วโมงที่ 5 แล้ว พบว่าตัวอย่างมีค่า pH ลดลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ปริมาณกรดแลคติกก็เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นกัน แต่ในอัตราที่ช้ากว่าช่วงแรก ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับปริมาณเชื้อแลคติก และมีลักษณะเคิร์ดที่แข็งขึ้น เนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้เป็น starter culture ผลิตกรดแลคติกมากขึ้น ทำให้ระบบมีค่า pH ลดลง ซึ่งเมื่อบ่มถึงชั่วโมงที่ 8 พบว่าตัวอย่างมีค่า pH เท่ากับ 4.89 ปริมาณกรดแลคติกเท่ากับ 0.87% โดยมีปริมาณเชื้อแลคติกทั้งหมด (total lactic acid bacteria) ประมาณ  $4 \times 10^{11}$  cfu/ml

จากการเจริญเติบโตและการผลิตกรดแลคติกของ starter culture จะเห็นว่า ช่วง lag phase ของ starter culture อยู่ช่วงชั่วโมงการบ่มที่ 1-2 ช่วง log phase (รูปที่ 5) อยู่ในชั่วโมงที่ 2-8 และหลังจากชั่วโมงที่ 8 เป็นต้นไป ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เริ่มมีค่าคงที่ซึ่งน่าจะเป็นช่วง stationary phase ซึ่งจากผลการศึกษาการเจริญเติบโตของ starter culture ในนมถั่วเหลืองนี้ทำให้ทราบว่าต้องบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ  $42 \pm 1^\circ\text{C}$  ประมาณ 8 ชั่วโมง จึงสามารถให้โยเกิร์ตเกิดเคิร์ดที่คงตัวที่มีค่า pH ประมาณ 4.89 ปริมาณกรดแลคติก ประมาณ 0.87% และปริมาณเชื้อแลคติกทั้งหมด (total lactic acid bacteria) ประมาณ  $10^{11}$  cfu/ml

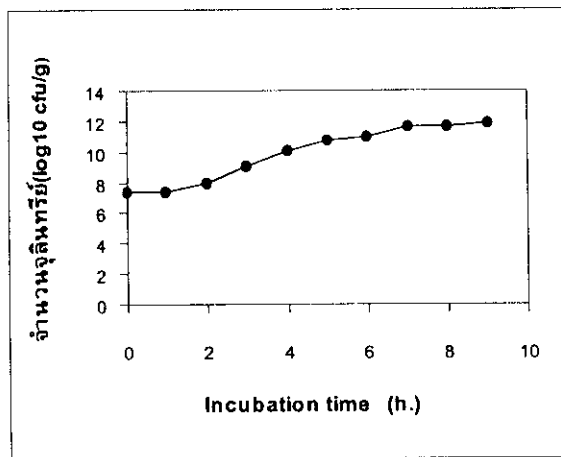


เมื่อสังเกตถึงการเจริญของเชื้อ *S.thermophilus* และ *Lb.bulgaricus* (รูปที่ 3 และ 4) ในการหมักโยเกิร์ตถั่วเหลือง ซึ่งมีผลต่อการสร้างกลิ่นรสและลักษณะเนื้อสัมผัสของโยเกิร์ตที่ได้ พบว่าเชื้อ *S.thermophilus* และ *Lb.bulgaricus* มีอัตราการเจริญเติบโตที่ใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 5 โดยในช่วงแรกเชื้อ *S.thermophilus* จะมีการเจริญเติบโตที่ดีกว่าเชื้อ *Lb.bulgaricus* เล็กน้อย เนื่องจากเชื้อ *S.thermophilus* มีอุณหภูมิการหมักที่เหมาะสมที่ 40°C ทำให้เจริญได้ดีกว่าและสร้างสาร diacetyl ซึ่งมีผลต่อกลิ่นรสของโยเกิร์ต และเมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่ง pH ประมาณ 5.5 ที่มีสารอาหารต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการเจริญของเชื้อ *Lb.bulgaricus* (วราวุฒิ และรุ่งนภา, 2532) โดยเชื้อ *Lb.bulgaricus* มีอุณหภูมิการหมักที่เหมาะสมที่ 45°C นอกจากนี้แล้วเชื้อ *Lb.bulgaricus* ยังสามารถผลิตกรดแลคติกและสร้างสาร acetaldehyde ที่ให้กลิ่นรสเฉพาะในโยเกิร์ต นอกจากนี้ยังสามารถผลิตกรดอะมิโนบางตัวที่เหมาะสมต่อการเจริญของเชื้อ *S.thermophilus* ทำให้ปริมาณของเชื้อทั้ง 2 ชนิดจึงมีไม่แตกต่างกันมากนักในช่วงหลังของการหมัก

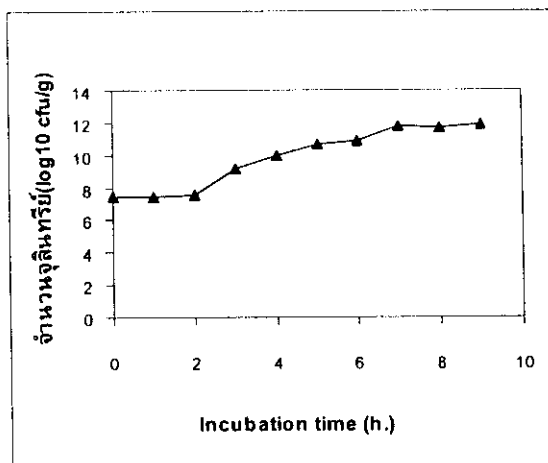


รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลง pH และ %Acidity ในระหว่างการหมักโยเกิร์ตถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ  $42 \pm 1^\circ\text{C}$  โดยใช้นมถั่วเหลืองที่มีปริมาณของแข็ง 8% และไมสไซส์โครคอลลอยด์;

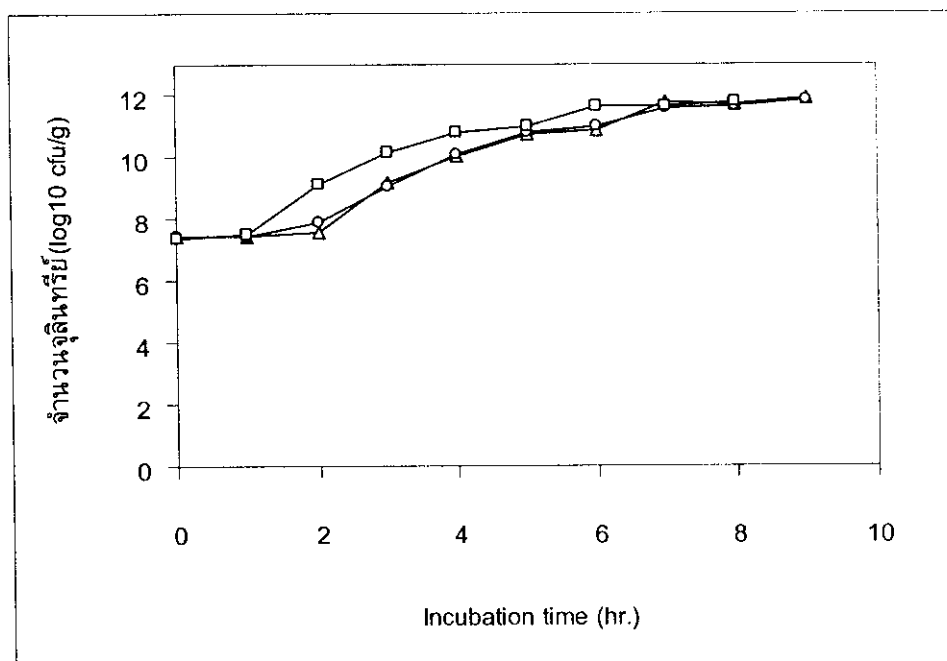
■ คือ pH และ ▲ คือ %Acidity



รูปที่ 3 การเจริญเติบโตของ *S. thermophilus* ระหว่างการหมักโยเกิร์ตด้วยเกลือที่อุณหภูมิ  $42 \pm 1^\circ\text{C}$  โดยใช้นมถั่วเหลืองที่มีปริมาณของแข็ง 8% และไม่ใส่ไฮโดรคอลลอยด์



รูปที่ 4 การเจริญเติบโตของ *Lb. bulgaricus* ระหว่างการหมักโยเกิร์ตด้วยเกลือที่อุณหภูมิ  $42 \pm 1^\circ\text{C}$  โดยใช้นมถั่วเหลืองที่มีปริมาณของแข็ง 8% และไม่ใส่ไฮโดรคอลลอยด์



รูปที่ 5 การเจริญเติบโตของ starter culture ระหว่างการหมักโยเกิร์ตด้วยเกลือที่อุณหภูมิ  $42 \pm 1^\circ\text{C}$  โดยใช้นมถั่วเหลืองที่มีปริมาณของแข็ง 8% และไม่ใส่ไฮโดรคอลลอยด์;  
□ คือ Total lactic acid bacteria, Δ คือ *S. thermophilus* และ ○ คือ *Lb. bulgaricus*

## 5. ปริมาณของไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณลักษณะต่างๆของโยเกิร์ตถ้วยเหลือง

เมื่อคัดเลือกชนิดของไฮโดรคอลลอยด์ได้แล้ว ขั้นตอนต่อมาจึงศึกษาถึงปริมาณของไฮโดรคอลลอยด์ดังกล่าวตามช่วงปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้ คือ xanthan gum และ LBG+xanthan gum (ratio 0.5:1) ที่ปริมาณ 0.2%, 0.35% และ 0.5% modified tapioca starch ศึกษาที่ปริมาณ 0.4%, 0.7% และ 1.0% modified rice starch ศึกษาที่ปริมาณ 0.5%, 1.0% และ 1.5% ตามลำดับ โดยการศึกษานี้ใช้ starter culture ในการหมักโยเกิร์ตถ้วยเหลืองที่อุณหภูมิ  $42 \pm 1^{\circ}\text{C}$  เวลา 8 ชั่วโมง ซึ่งผลการเปลี่ยนแปลงค่า pH ปริมาณกรดแลคติก การเกิด syneresis และความแข็งของเคิร์ดที่วัดเนื้อสัมผัสแบบ back extrusion force แสดงดังตารางที่ 15 จากการทดสอบทางสถิติพบว่า การเติมไฮโดรคอลลอยด์ส่งผลให้โยเกิร์ตถ้วยเหลืองเกิด syneresis ลดลงกว่าการไม่เติมไฮโดรคอลลอยด์ และเมื่อเพิ่มปริมาณของไฮโดรคอลลอยด์ดังกล่าวก็ส่งผลให้โยเกิร์ตถ้วยเหลืองมี %syneresis ลดลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อพิจารณาถึงชนิดของไฮโดรคอลลอยด์ต่อค่าความแข็งของเคิร์ด พบว่า xanthan gum ให้โยเกิร์ตถ้วยเหลืองที่มีค่าความแข็งมากที่สุด รองลงมา คือ modified tapioca starch, modified rice starch และ LBG+xanthan gum (ratio 0.5:1)

ตารางที่ 15 ปริมาณไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณลักษณะต่างๆ ของโยเกิร์ตถ้วยเหลือง

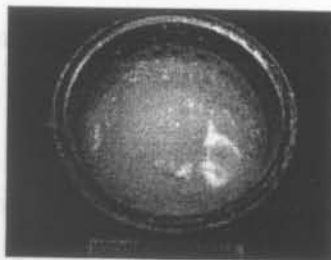
| Sample                      | pH                   | Acidity (%) | Syneresis (%) | Back extrusion force (g) |
|-----------------------------|----------------------|-------------|---------------|--------------------------|
| Without hydrocolloid        | 4.68a <sup>(1)</sup> | 0.642a      | 8.97a         | 1,367bcd                 |
| 0.4%Modified Tapioca starch | 4.63a                | 0.656a      | 5.10bc        | 1,334bcd                 |
| 0.7%Modified Tapioca starch | 4.64a                | 0.667a      | 4.90c         | 1,436bc                  |
| 1.0%Modified Tapioca starch | 4.68a                | 0.649a      | 4.73c         | 1,361bcd                 |
| 0.5% Modified Rice starch   | 4.61a                | 0.710a      | 4.87c         | 1,290bcd                 |
| 1.0% Modified Rice starch   | 4.67a                | 0.652a      | 4.73c         | 1,068bcde                |
| 1.5% Modified Rice starch   | 4.66a                | 0.655a      | 4.40c         | 920de                    |
| 0.2%Xanthan Gum             | 4.63a                | 0.672a      | 5.90b         | 3,019a                   |
| 0.35%Xanthan Gum            | 4.65a                | 0.683a      | 2.63d         | 1,505b                   |
| 0.5%Xanthan Gum             | 4.67a                | 0.640a      | 2.24d         | 996cde                   |
| 0.2%Xanthan+ LBG(0.5:1)     | 4.70a                | 0.640a      | 2.93d         | 812e                     |
| 0.35%Xanthan+ LBG(0.5:1)    | 4.68a                | 0.611a      | 2.03de        | 921de                    |
| 0.5%Xanthan+ LBG(0.5:1)     | 4.82a                | 0.596a      | 1.10de        | 1,117bcde                |

<sup>(1)</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่งหมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.01$ )

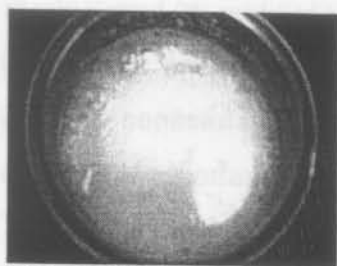
ด้านลักษณะปรากฏของโยเกิร์ตถ้วยเหลืองทุกชนิด พบว่ามีลักษณะผิวหน้าเรียบนวล โดยโยเกิร์ตถ้วยเหลืองที่เติม modified tapioca starch และ modified rice starch เนื้อสัมผัสโดยส่วนใหญ่ค่อนข้างเนียน ละเอียดยืด พอสสมควร ส่วนโยเกิร์ตถ้วยเหลืองที่เติม xanthan gum และ LBG+xanthan gum (ratio 0.5:1) เนื้อสัมผัสโดยส่วนใหญ่ยังไม่เนียน ละเอียดยืด เป็นเนื้อเดียวกันเท่าที่ควร และที่ทุกปริมาณของ xanthan gum ให้โยเกิร์ตถ้วยเหลืองที่มีลักษณะเนื้อร่วนซึ่งแสดงดังตารางที่ 16 ดังนั้นจึงเลือก modified tapioca starch ปริมาณ 1% และ modified rice starch ปริมาณ 1.5% ในการทำโยเกิร์ตถ้วยเหลือง เนื่องจากให้โยเกิร์ตที่มีความแข็งของเคิร์ดต่ำสุด มีลักษณะเนื้อสัมผัสค่อนข้างเนียน ละเอียดยืด และเกิด syneresis น้อย

ตารางที่ 16 ลักษณะปรากฏของโยเกิร์ตถ้วยเหลือง 8 % total solid soymilk ที่เติมไฮโดรคอลลอยด์ ปริมาณต่างๆ

| Sample                      | Appearance of soy yoghurt   |
|-----------------------------|---|
| Without hydrocolloid        | เนื้อสัมผัสค่อนข้างนุ่ม เนียนละเอียดยืดเป็นเนื้อเดียวกันเท่าที่ควร  |
| 0.4%Modified Tapioca starch | เนื้อสัมผัสค่อนข้างเนียน ละเอียดยืด พอสสมควร ผิวหน้าเรียบ นวล   |
| 0.7%Modified Tapioca starch | เนื้อสัมผัสค่อนข้างเนียน ละเอียดยืด พอสสมควร ผิวหน้าเรียบ นวล   |
| 1.0%Modified Tapioca starch | เนื้อสัมผัสค่อนข้างเนียน ละเอียดยืด พอสสมควร ผิวหน้าเรียบ นวล   |
| 0.5% Modified Rice starch   | เนื้อสัมผัสค่อนข้างเนียน ละเอียดยืด ผิวหน้าเรียบ นวล  |
| 1.0% Modified Rice starch   | เนื้อสัมผัสค่อนข้างเนียน ละเอียดยืด พอสสมควร ผิวหน้าเรียบ นวล   |
| 1.5% Modified Rice starch   | เนื้อสัมผัสค่อนข้างเนียน ละเอียดยืด พอสสมควร ผิวหน้าเรียบ นวล   |
| 0.2%Xanthan Gum             | เนื้อสัมผัสอ่อน นุ่ม ปานกลาง ร่วน มีลักษณะไม่ค่อยเนียนละเอียดยืด  |
| 0.35%Xanthan Gum            | เนื้อสัมผัสมีลักษณะร่วน และแข็งขึ้นกว่า 0.2% แต่ยังไม่ค่อยเนียนละเอียดยืดเท่าที่ควร                           |
| 0.5%Xanthan Gum             | เนื้อสัมผัสมีลักษณะร่วนและแข็งพอสสมควร และไม่ค่อยเนียนเป็นเนื้อเดียวกัน                                       |
| 0.2%Xanthan + LBG(0.5:1)    | เนื้อสัมผัสอ่อนนุ่ม ผิวหน้าเรียบ แต่ยังไม่เนียนเป็นเนื้อเดียวกัน  |
| 0.35%Xanthan + LBG(0.5:1)   | เนื้อสัมผัสอ่อนนุ่ม ผิวหน้าเรียบ แต่ยังไม่เนียนเท่าที่ควร มีเม็ดเล็กๆ ปนอยู่เล็กน้อย                          |
| 0.5%Xanthan + LBG(0.5:1)    | เนื้อสัมผัสแข็งเล็กน้อย ผิวหน้าเรียบ แต่ยังไม่ค่อยเนียนเป็นเนื้อเดียวกันเท่าที่ควร มีเม็ดเล็กๆ ปนอยู่เล็กน้อย |



Without hydrocolloid



0.4% Modified tapioca starch



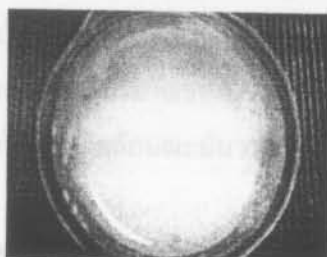
0.7% Modified tapioca starch



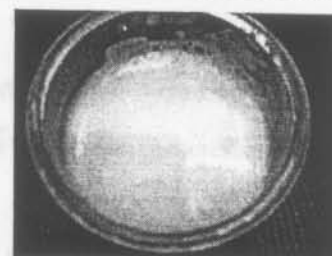
1.0% Modified tapioca starch



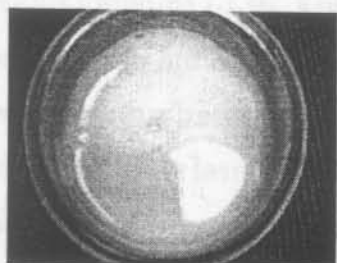
0.5% Modified rice starch



1.0% Modified rice starch



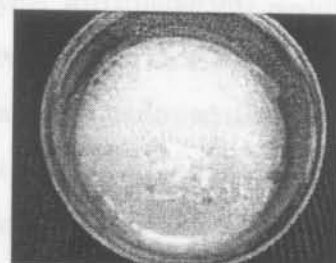
1.5% Modified rice starch



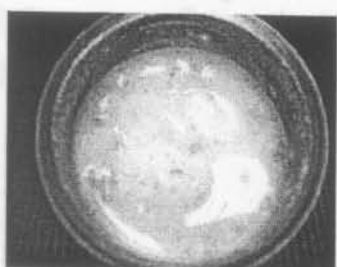
0.2% Xanthan gum



0.35% Xanthan gum



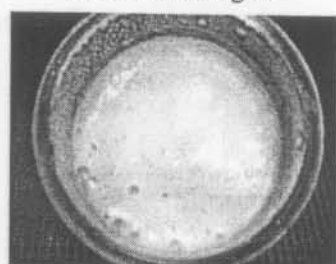
0.5% Xanthan gum



0.2% Xanthan + LBG (0.5 : 1)



0.35% Xanthan + LBG (0.5 : 1)



0.5% Xanthan + LBG (0.5 : 1)

รูปที่ 6 ลักษณะปรากฏของโยเกิร์ตถั่วเหลือง 8 % total solid soymilk ที่ใช้ commercial starter culture และเติมไฮโดรคอลลอยด์ปริมาณต่างๆ

## 6. ปริมาณของแข็งในนมถั่วเหลืองต่อคุณลักษณะทางกายภาพ และเนื้อสัมผัสของโยเกิร์ตถั่วเหลือง

การศึกษาปริมาณของแข็งในนมถั่วเหลืองมี 3 ระดับ คือ 8% 10% และ 12% ตามลำดับ โดยผลการทดลอง แสดงดังตารางที่ 17 ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของแข็งในนมถั่วเหลือง มีผลให้โยเกิร์ตถั่วเหลืองทั้งหมดเกิด syneresis และมีลักษณะเนื้อสัมผัสในด้านความแข็งซึ่งตรวจวัดด้วยเครื่อง Texture analyzer ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ส่วนผลของการเติมและไม่เติมไฮโดรคอลลอยด์ต่อการเกิด syneresis พบว่าการเติม 1.0% modified tapioca starch และ 1.5% modified rice starch ในโยเกิร์ตถั่วเหลืองทำให้เกิด syneresis ลดลงจากโยเกิร์ตถั่วเหลืองที่ไม่เติมไฮโดรคอลลอยด์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.01$ ) แต่ไฮโดรคอลลอยด์ทั้ง 2 ชนิด มีผลต่อการลดการเกิด syneresis ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.01$ ) สำหรับลักษณะเนื้อสัมผัสของโยเกิร์ตถั่วเหลืองให้ผลเช่นเดียวกับการเกิด syneresis คือ การเติมไฮโดรคอลลอยด์ ทำให้โยเกิร์ตถั่วเหลืองมีค่าความแข็งเพิ่มมากกว่าโยเกิร์ตถั่วเหลืองที่ไม่เติมไฮโดรคอลลอยด์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) แต่ไฮโดรคอลลอยด์ทั้ง 2 ชนิดมีผลทำให้การเพิ่มความแข็งของเนื้อสัมผัสโยเกิร์ตถั่วเหลืองไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.01$ ) โดยลักษณะปรากฏของโยเกิร์ตถั่วเหลืองทั้งที่เติมและไม่เติมไฮโดรคอลลอยด์ที่ปริมาณของแข็งต่างๆ แสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งจะเห็นว่าโยเกิร์ตถั่วเหลืองทั้งหมดมีผิวหน้าค่อนข้างเรียบ เกิดลักษณะมันวาวที่ผิวหน้า และเกิด syneresis ที่ผิวหน้าคล้ายๆกัน

จากผลการศึกษาปริมาณของแข็งข้างต้น การเติม modified starch ทั้ง 2 ชนิด ทำให้ปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้นถึง 1-1.5% จึงทำการศึกษาผลของการเติม glucose syrup ที่ปริมาณเดียวกับ modified tapioca starch และ modified rice starch กับนมถั่วเหลืองที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 8% ให้มีปริมาณของแข็งทั้งหมดไม่แตกต่างกัน เพื่อเป็นการยืนยันผลของการเกิด syneresis และลักษณะเนื้อสัมผัสว่าเกิดจากการเติมไฮโดรคอลลอยด์ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 18 พบว่าการเติม glucose syrup มีผลทำให้โยเกิร์ตถั่วเหลืองเกิด syneresis มากกว่าโยเกิร์ตถั่วเหลืองที่เติม 1.0% modified tapioca starch และ 1.5% modified rice starch ( $p < 0.01$ ) แต่ลักษณะเนื้อสัมผัสของโยเกิร์ตถั่วเหลืองที่เติม glucose syrup และไฮโดรคอลลอยด์ไม่แตกต่างกัน จึงแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเติมไฮโดรคอลลอยด์ส่งผลให้โยเกิร์ตถั่วเหลืองเกิด syneresis ลดลง และมีลักษณะเนื้อสัมผัสแข็งขึ้น

ตารางที่ 17 ปริมาณของแข็งทั้งหมดในนมถั่วเหลืองต่อคุณลักษณะต่างๆของโยเกิร์ตถั่วเหลือง

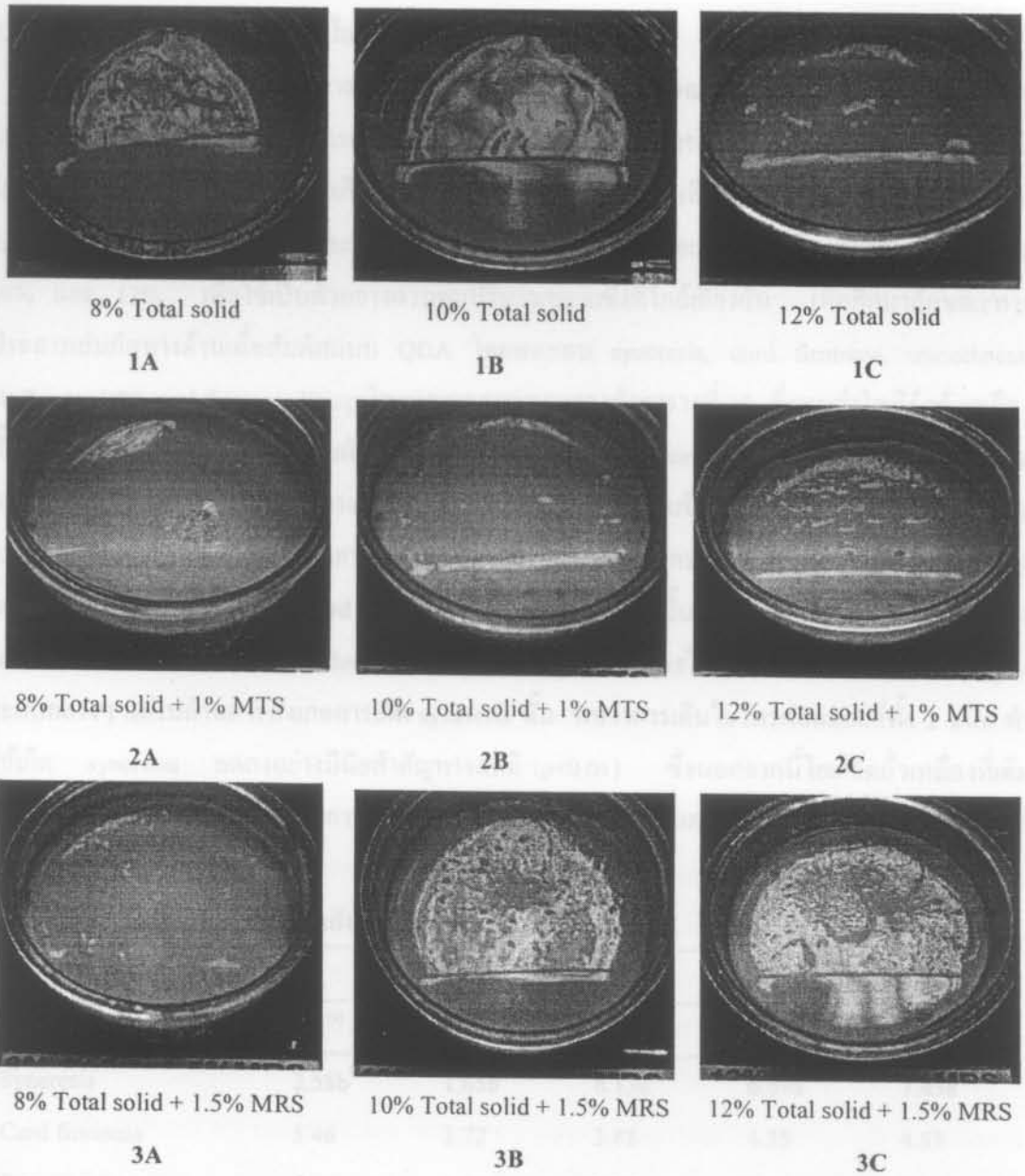
| Solid of soymilk (%w/w) | Hydrocolloid                | pH                    | Acidity (%) | Syneresis (%) | Back Extrusion Force (g) |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------|---------------|--------------------------|
| 8                       | none                        | 4.53 a <sup>(1)</sup> | 0.820 a     | 4.93 b        | 584.67 a                 |
|                         | 1.0%modified tapioca starch | 4.58 a                | 0.821 a     | 3.57 a        | 715.65 b                 |
|                         | 1.5% modified rice starch   | 4.62 a                | 0.799 a     | 3.10 a        | 794.58 b                 |
| 10                      | none                        | 4.64 a                | 0.785 a     | 5.17 b        | 384.20 a                 |
|                         | 1.0%modified tapioca starch | 4.63 a                | 0.815 a     | 3.70 a        | 825.57 b                 |
|                         | 1.5% modified rice starch   | 4.60 a                | 0.814 a     | 5.87 a        | 680.90 b                 |
| 12                      | none                        | 4.65 a                | 0.758 a     | 6.47 b        | 698.55 a                 |
|                         | 1.0%modified tapioca starch | 4.62 a                | 0.776 a     | 3.27 a        | 857.60 b                 |
|                         | 1.5% modified rice starch   | 4.58a                 | 0.813 a     | 2.70 a        | 739.57 b                 |

<sup>(1)</sup> ตัวอักษรตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแนวดิ่ง หมายถึง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ( $p<0.01$ ) ในชนิดของไฮโดรคอลลอยด์ ( $p<0.01$ )

ตารางที่ 18 ผลของการเติม glucose syrup ในนมถั่วเหลืองต่อคุณลักษณะต่างๆของโยเกิร์ตถั่วเหลือง

| Solid of soymilk (%w/w) | Type                        | pH                    | Acidity (%) | Syneresis (%) | Back Extrusion Force (g) |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------|---------------|--------------------------|
| 8                       | 1.0% glucose syrup          | 4.70 a <sup>(1)</sup> | 0.815 a     | 5.26 b        | 776.05 a                 |
|                         | 1.0%modified tapioca starch | 4.72 a                | 0.832 a     | 3.93 a        | 752.12 a                 |
|                         | 1.5% glucose syrup          | 4.65 a                | 0.774 a     | 5.73 b        | 744.55 a                 |
|                         | 1.5% modified rice starch   | 4.69 a                | 0.761 a     | 3.77 a        | 736.90 a                 |

<sup>(1)</sup> ตัวอักษรตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแนวดิ่ง หมายถึง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ( $p<0.01$ ) ในชนิดของไฮโดรคอลลอยด์ ( $p<0.01$ )



รูปที่ 7 ลักษณะปรากฏของโยเกิร์ตถั่วเหลืองที่เตรียมจากนมถั่วเหลืองปริมาณของแข็ง 8 % ที่ไม่เติมไฮโดรคอลลอยด์ (1A), เติม 1% modified tapioca starch (2A) และ 1.5% modified rice starch (3A), โยเกิร์ตถั่วเหลืองที่เตรียมจากนมถั่วเหลืองปริมาณของแข็ง 10 % ที่ไม่เติมไฮโดรคอลลอยด์ (1B), เติม 1% modified tapioca starch (2B) และ 1.5% modified rice starch (3B), โยเกิร์ตถั่วเหลืองที่เตรียมจากนมถั่วเหลืองปริมาณของแข็ง 12 % ที่ไม่เติมไฮโดรคอลลอยด์ (1C), เติม 1% modified tapioca starch (2C) และ 1.5% modified rice starch (3C)



## 8. ลักษณะทางประสาทสัมผัสของโยเกิร์ตถั่วเหลือง

จากการศึกษาผลของปริมาณของแข็งในนมถั่วเหลืองต่อลักษณะทางกายภาพและความแข็งของโยเกิร์ตถั่วเหลือง ทำให้ทราบว่า การเพิ่มปริมาณของแข็งไม่มีผลต่อการเกิด syneresis และความแข็งของโยเกิร์ตถั่วเหลือง ดังนั้นจึงเลือกโยเกิร์ตถั่วเหลืองที่เตรียมจากนมถั่วเหลืองที่มีปริมาณของแข็ง 8% ที่เติม 1.0% modified tapioca starch และ 1.5% modified rice starch และนมถั่วเหลืองที่มีปริมาณของแข็ง 10% และ 12% เพื่อใช้เป็นตัวอย่างควบคุมปริมาณของแข็งที่ใกล้เคียงกัน เพื่อศึกษาลักษณะทางประสาทสัมผัสทางด้านเนื้อสัมผัสแบบ QDA โดยทดสอบ syneresis, curd firmness, smoothness, chalkiness และ curd firmness liking โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 19 ซึ่งพบว่าโยเกิร์ตถั่วเหลืองทั้งหมดให้ลักษณะทางประสาทสัมผัสทั้งทางด้าน curd firmness, smoothness, chalkiness และ curd firmness liking ไม่แตกต่างกันทางสถิติ นั่นคือ ความชอบความแข็งไม่แตกต่างกัน เนื่องจาก curd firmness ไม่แตกต่างกัน ซึ่งให้ผลการทดลองสอดคล้องกับการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องมือ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความแข็งของ curd ในช่วง 400 – 800 g นั้นผู้ทดสอบชอบในระดับปานกลาง นอกจากนั้นลักษณะของ smoothness และ chalkiness ของโยเกิร์ตถั่วเหลืองก็มีลักษณะอยู่ในระดับกลางๆ แต่ในด้านการสังเกตการเกิด syneresis นั้น พบว่าการเติมไฮโดรคอลลอยด์ทั้ง 2 ชนิด ทำให้เกิด syneresis ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.01$ ) ซึ่งนอกจากนี้โยเกิร์ตถั่วเหลืองที่เติมไฮโดรคอลลอยด์ทั้ง 2 ชนิดให้ผลการทดสอบด้านประสาทสัมผัสไม่แตกต่างกันทางสถิติในทุกลักษณะ

ตารางที่ 19 ลักษณะทางประสาทสัมผัสของโยเกิร์ตถั่วเหลือง

| Attribute            | Mean score           |       |       |       |       |
|----------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
|                      | 8TS <sup>(1)</sup>   | 8RS   | 8     | 10    | 12    |
| Syneresis            | 2.58b <sup>(2)</sup> | 1.65b | 6.13a | 6.69a | 7.43a |
| Curd firmness        | 5.46                 | 3.72  | 3.88  | 4.55  | 4.53  |
| Smoothness           | 5.26                 | 3.87  | 5.78  | 5.46  | 5.28  |
| Chalkiness           | 5.53                 | 4.30  | 3.57  | 5.08  | 5.70  |
| Curd firmness liking | 4.81                 | 3.66  | 5.33  | 3.66  | 5.41  |

<sup>(1)</sup> 8TS คือ soy yoghurt from 8% soymilk solid with 1% modified tapioca starch

8RS คือ soy yoghurt from 8% soymilk solid with 1.5% modified rice starch

8 คือ soy yoghurt from 8% soymilk solid

10 คือ soy yoghurt from 10% soymilk solid

12 คือ soy yoghurt from 12% soymilk solid

<sup>(2)</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวอนหมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.01$ )

## 9. การศึกษาสภาวะการทำแห้งแบบ spray drying ของโยเกิร์ตถั่วเหลืองผง

การศึกษากการทำโยเกิร์ตถั่วเหลืองผงใช้วิธี spray drying โดยแปรปริมาณของแข็งในโยเกิร์ต 3 ระดับ คือ 14%, 21% และ 28% ส่วน inlet temperature ศึกษาที่ 2 ระดับ คือ 110°C และ 120°C สำหรับ outlet temperature ควบคุมให้คงที่ที่ 70°C ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 20 ซึ่งจากการตรวจนับจำนวน total lactic acid bacteria ในโยเกิร์ตถั่วเหลืองผงที่เตรียมจากสภาวะต่าง ๆ นั้น พบว่า % solid ของโยเกิร์ตถั่วเหลืองเริ่มต้นก่อนการ spray drying มีผลต่อจำนวน total lactic acid bacteria อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) คือ ปริมาณของแข็งที่ 21% และ inlet temperature 110°C ให้โยเกิร์ตถั่วเหลืองที่มีจำนวน total lactic acid bacteria มากที่สุด

สำหรับ % yield ซึ่งคิดเทียบจากน้ำหนักทั้งหมดของ โยเกิร์ตถั่วเหลืองหลังปรับ % solid พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.01$ ) โดยปริมาณของแข็ง 14% และ 21% ให้โยเกิร์ตถั่วเหลืองที่มี % yield มากกว่าที่ปริมาณของแข็ง 28% ส่วน โยเกิร์ตถั่วเหลืองที่มีปริมาณของแข็ง 28 % solid นั้นมี % yield ต่ำ อาจเนื่องจากการที่มีปริมาณของแข็งมาก ซึ่งเมื่อ spray dry ที่อุณหภูมิสูง อาจส่งผลให้โปรตีนเกิดการ gelation จึงได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแผ่นจึงทำให้ได้ yield ต่ำ เมื่อพิจารณาผลของ inlet temperature พบว่าที่ 110°C ให้โยเกิร์ตถั่วเหลืองที่มี % yield มากกว่าที่ 120°C โดยที่สภาวะ 21% total solid, inlet temperature 110°C มีปริมาณ yield มากที่สุด รองลงมา คือ 14% total solid, inlet temperature 110°C แสดงดังตารางที่ 20

สมบัติการละลาย (solubility) ของโยเกิร์ตถั่วเหลืองผงนั้น พบว่าที่ทุกสภาวะของการทำแห้งไม่มีการผลต่อการละลายของโยเกิร์ตถั่วเหลือง โดยโยเกิร์ตถั่วเหลืองที่ได้มีค่าการละลายไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 20) เนื่องมาจาก inlet temperature ที่ใช้มีค่าไม่ต่างกันมาก จึงทำให้โปรตีนมีการเสียสภาพใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามค่าการละลายของโยเกิร์ตถั่วเหลืองที่มีปริมาณของแข็ง 14 และ 21% ก็ยังสูงอยู่

ส่วนค่าสีของโยเกิร์ตถั่วเหลืองผง พบว่าค่า L และ a มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.01$ ) ส่วน b มีค่าไม่แตกต่างกัน โดยที่ปริมาณของแข็ง 14% โยเกิร์ตถั่วเหลืองผงมีความสว่าง (L value) มากกว่าที่ปริมาณของแข็ง 21% ส่วนที่ปริมาณของแข็ง 14% ให้โยเกิร์ตถั่วเหลืองผงมีค่าสีแดง (a value) มากกว่าที่ปริมาณของแข็ง 21 และ 28% สำหรับค่าสีเหลือง (b value) ของโยเกิร์ตถั่วเหลืองผงพบว่าที่ทุกปริมาณของแข็งให้โยเกิร์ตถั่วเหลืองที่มีค่าสีเหลืองไม่แตกต่างกันทางสถิติ แสดงดังตารางที่ 21 ส่วนผลของ inlet temperature พบว่าที่ 110°C ให้โยเกิร์ตถั่วเหลืองที่มีความสว่างมากกว่าที่ 120°C แต่ค่าสีแดงมีแนวโน้มน้อยกว่า ส่วนสีเหลืองมีค่าไม่แตกต่างกัน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากอุณหภูมิสูงทำให้โยเกิร์ตถั่วเหลืองเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้มากกว่า

เมื่อพิจารณาทุกลักษณะร่วมกัน พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำโยเกิร์ตถั่วเหลืองผง คือ 21% total solid, inlet temperature 110°C เนื่องจากให้ % yield สูงที่สุด ประกอบกับมีค่าการละลายและปริมาณเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มแลคติกอยู่ในระดับสูง

ตารางที่ 20 ผลการทำโยเกิร์ตด้วยหัวเชื้อผงที่สภาวะต่างๆ โดยวิธี spray drying

| Condition | Solid (%) | Inlet Temperature (°C) | Yield (%)              | Solubility (%) | Total lactic acid bacteria (cfu/g) |
|-----------|-----------|------------------------|------------------------|----------------|------------------------------------|
| 1         | 14        | 110                    | 61.09 a <sup>(1)</sup> | 78.50 a        | 1.17E+08 c                         |
| 2         |           | 120                    | 58.70 a                | 77.58 a        | 7.52E+07 c                         |
| 3         | 21        | 110                    | 66.36 a                | 80.75 a        | 7.94E+08 a                         |
| 4         |           | 120                    | 57.27 a                | 78.25 a        | 5.31E+08 b                         |
| 5         | 28        | 110                    | 13.74 b                | 82.73 a        | 2.90E+08 c                         |
| 6         |           | 120                    | 12.21 b                | 80.50 a        | 5.86E+08 ab                        |

<sup>(1)</sup> ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ( $p < 0.05$ )

ตามวิธี Duncan's multiple range test (DMRT)

ตารางที่ 21 ผลการวัดสีโยเกิร์ตด้วยหัวเชื้อผงที่สภาวะต่างๆ โดยวิธี spray drying

| Condition | Solid (%) | Inlet Temperature (°C) | L                      | a       | b       |
|-----------|-----------|------------------------|------------------------|---------|---------|
| 1         | 14        | 110°C                  | 93.42 a <sup>(1)</sup> | -0.63 b | 12.22 a |
| 2         |           | 120°C                  | 90.48 ab               | -0.80 b | 15.12 a |
| 3         | 21        | 110°C                  | 89.31 b                | 0.15 a  | 16.12 a |
| 4         |           | 120°C                  | 87.58 b                | 0.38 a  | 16.22 a |
| 5         | 28        | 110°C                  | 90.39 ab               | 0.33 a  | 13.35 a |
| 6         |           | 120°C                  | 89.87 ab               | 0.24 a  | 12.70 a |

<sup>(1)</sup> ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ( $p < 0.05$ )

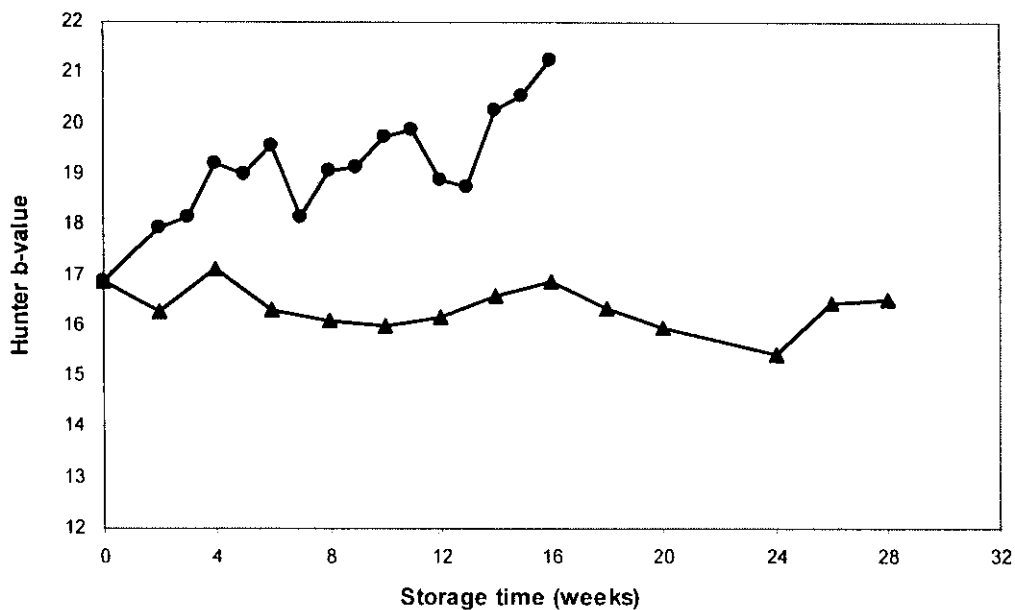
ตามวิธี Duncan's multiple range test (DMRT)

## 10. การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของโยเกิร์ตตัวเหลืองผงในระหว่างการเก็บรักษา

### 10.1 คำสี

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าสีเหลือง (b-value) ของโยเกิร์ตตัวเหลืองผงในระหว่างการเก็บรักษา เพื่อติดตามปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลหรือปฏิกิริยาเมลลาร์ด ดังรูปที่ 8 จะเห็นว่า ค่า b-value ของโยเกิร์ตตัวเหลืองผงที่เก็บที่อุณหภูมิ 25°C มีการเปลี่ยนแปลงน้อย ส่วนโยเกิร์ตตัวเหลืองผงที่เก็บอุณหภูมิ 45°C นั้น ค่า b-value มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น หลังจากการเก็บในสัปดาห์ที่ 13 และจากการเพิ่มขึ้นของค่า b-value ในโยเกิร์ตตัวเหลืองผง แสดงให้เห็นว่าโยเกิร์ตตัวเหลืองผงมีสีเหลืองเข้มขึ้นในระหว่างการเก็บ หรือโยเกิร์ตตัวเหลืองผงเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดในระหว่างการเก็บเพราะในโยเกิร์ตตัวเหลืองผงมีทั้งโปรตีนและน้ำตาลซึ่งเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยา นอกจากนี้ในการปรับปริมาณของแข็งของโยเกิร์ตตัวเหลืองก่อน spray drying ได้ใช้ Soy Protein Isolate (SPI) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดได้ในระหว่างการเก็บรักษา (Davies et al., 1998)

เมื่อเปรียบเทียบค่า b-value ของโยเกิร์ตตัวเหลืองผงระหว่างทั้ง 2 อุณหภูมิ ที่ระยะเวลาในการเก็บเท่ากัน จะพบว่า โยเกิร์ตตัวเหลืองผงที่เก็บที่อุณหภูมิ 45°C มีสีเหลืองเข้มกว่าที่อุณหภูมิ 25°C อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.01$ ) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิสูงสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดให้เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียน้ำออกจากโมเลกุลน้ำตาล ทำให้มีน้ำเกิดขึ้น และโมเลกุลของน้ำตาลซูโครสที่เติมลงไป และแรฟฟิโนสที่มีในถั่วเหลือง ก็สามารถถูกไฮโดรไลซ์เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งมากขึ้นในระหว่างการหมัก ดังนั้นเมื่อน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งได้รับความร้อนในภาวะที่มีน้ำก็จะทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนได้มากขึ้นอัตราเร็วของปฏิกิริยาเมลลาร์ดจึงเพิ่มขึ้นด้วย

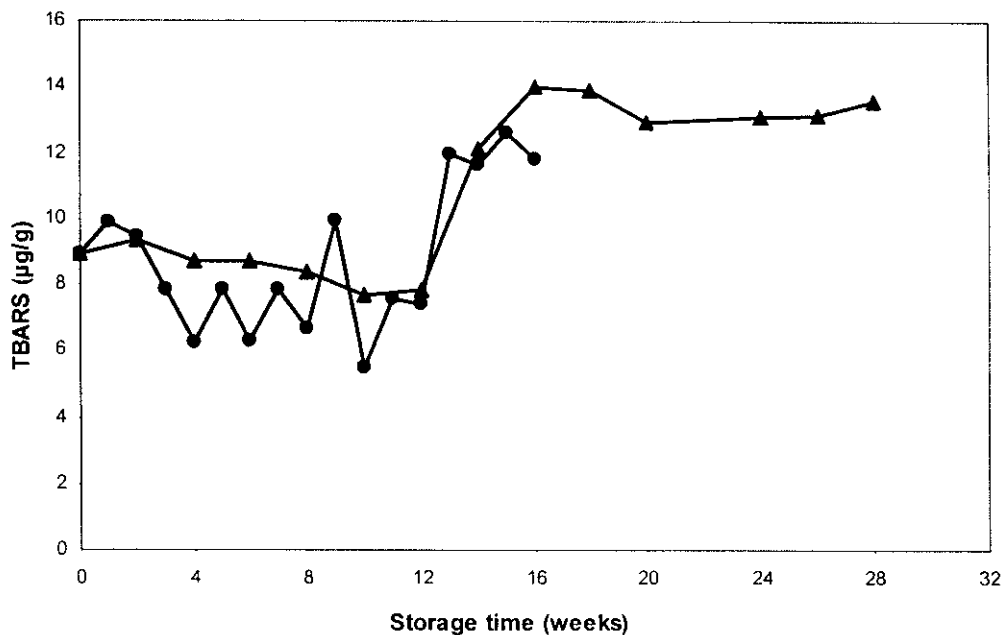


รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงค่าสีเหลือง (b-value) ของโยเกิร์ตตัวเหลืองผงในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่างๆ; ▲ คือ 25°C และ ● คือ 45°C

## 10.2 ค่า Thiobarbituric acid reactive substance (TBARS)

การวิเคราะห์ค่า TBARS เป็นการวัดปริมาณ malonaldehyde ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ลำดับที่สองของปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัว ที่เกิดจากการสลายของไฮโดรเปอร์ออกไซด์

จากรูปที่ 9 แสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่า TBARS ของโยเกิร์ตถ้วยเหลืองผงที่เก็บไว้ 2 อุณหภูมิ คือ 25 °C และ 45 °C โดยพบว่าลักษณะแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่า TBARS ของโยเกิร์ตถ้วยเหลืองทั้ง 2 อุณหภูมิคล้ายกัน คือ ในช่วงระยะเวลาแรกของการเก็บ (สัปดาห์ที่ 1-12) ค่า TBARS ค่อนข้างคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก หลังจากนั้นจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแล้วค่อนข้างคงที่ในช่วงท้าย เนื่องจากสถานะในการเก็บเป็นการบรรจุแบบสุญญากาศและใช้บรรจุภัณฑ์เป็นอะลูมิเนียมฟอยล์ ที่สามารถป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนและความชื้นได้ ซึ่งออกซิเจนนั้นเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เมื่อปริมาณของไขมันในโยเกิร์ตถ้วยเหลืองมีน้อยและปริมาณออกซิเจนมีน้อยทำให้การเกิดออกซิเดชันของกรดไขมันเกิดน้อย ทำให้ค่า TBARS เพิ่มขึ้นไม่มากนักและคงที่ในช่วงหลัง โดยเมื่อปริมาณออกซิเจนที่จะทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระถูกใช้หมด กลไกการเกิดออกซิเดชันและไฮโดรเปอร์ออกไซด์จึงสิ้นสุดลง ทำให้ปริมาณ malonaldehyde คงที่



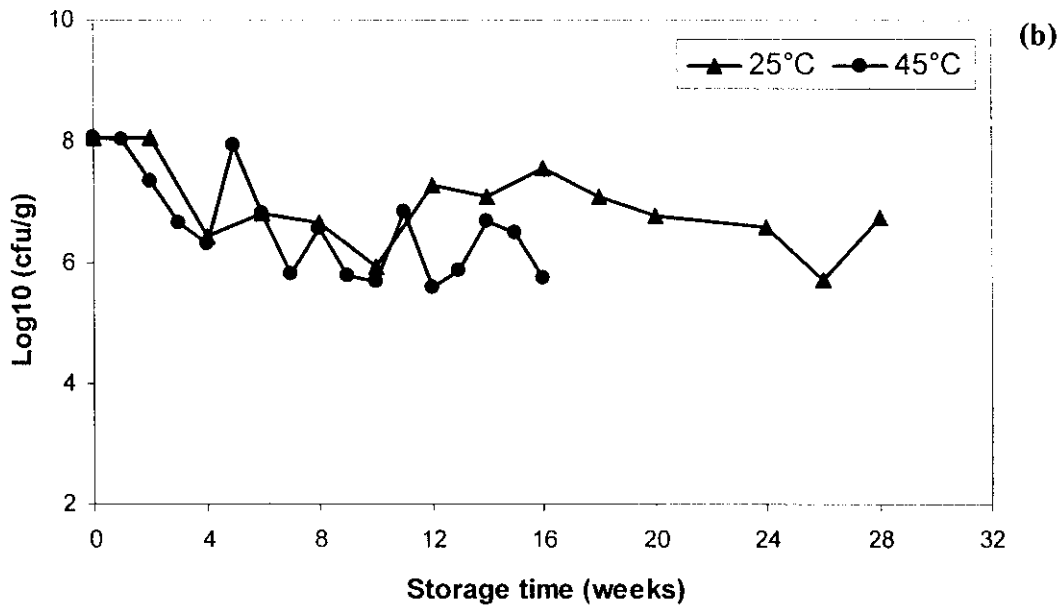
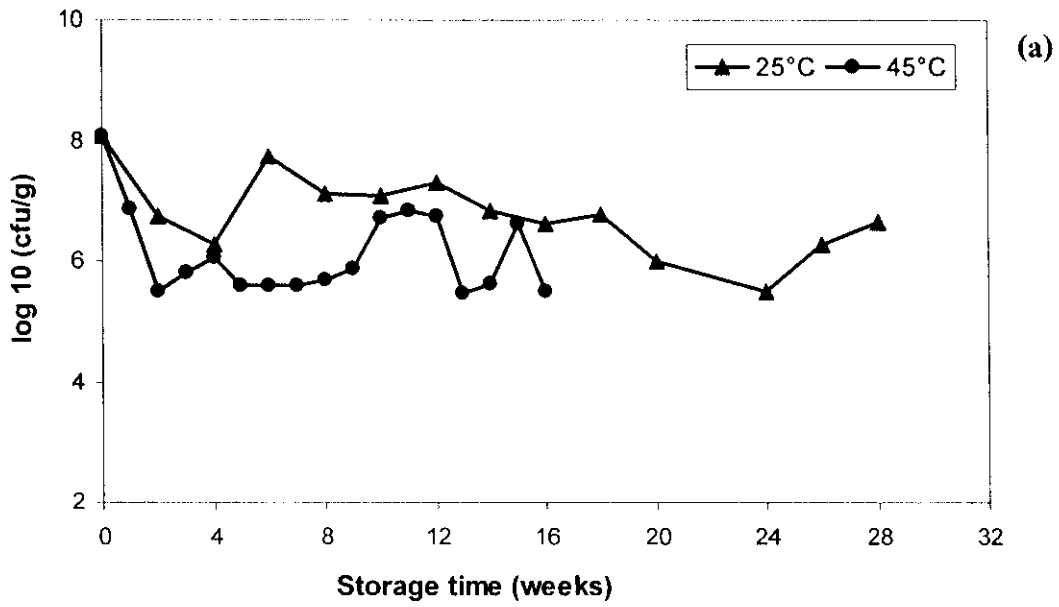
รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงค่า TBARS ของโยเกิร์ตถ้วยเหลืองผงในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่างๆ; ▲ คือ 25°C และ ● คือ 45°C

จากรูปจะเห็นว่าค่า TBARS ของโยเกิร์ตถ้วยเหลืองผงที่เก็บที่อุณหภูมิ 25°C มีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 45°C นั้น อาจเป็นเพราะว่าที่อุณหภูมิ 45°C มีการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดมากกว่าที่ 25°C (รูปที่ 8) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเมลลาร์ดนั้นมีคุณสมบัติเป็นสารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (antioxidant) จึงทำให้ที่อุณหภูมิ 45°C เกิดออกซิเดชันได้น้อยกว่าที่อุณหภูมิ 25°C นอกจากนี้การวิเคราะห์ค่า TBARS นี้ เป็นการวัดปริมาณ malonaldehyde โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 538 นาโนเมตร แต่การเกิดออกซิเดชันของโยเกิร์ตถ้วยเหลืองอาจเกิดสารประกอบอื่นๆที่ไม่ใช่ malonaldehyde เช่น สารประกอบพวก alkanal และ 2, 4 - dienals ซึ่งสารประกอบพวกนี้จะทำปฏิกิริยากับ Thiobarbituric acid แล้วให้สีเหลืองที่ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2545)

### 10.3 ปริมาณจุลินทรีย์ (Starter Culture)

จากการศึกษาจำนวนเชื้อ *Lb. bulgaricus* และ *S. thermophilus* ในโยเกิร์ตถ้วยเหลืองผง ซึ่งมีจำนวนเชื้อเริ่มต้นแต่ละชนิดประมาณ  $1.17 \times 10^8$  cfu/g ดังรูปที่ 10 พบว่าในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C และ 45°C นั้น *Lb. bulgaricus* มีจำนวนลดลงในช่วง 2 สัปดาห์แรก และ *S. thermophilus* มีจำนวนลดลงหลังจากสัปดาห์ที่ 2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.01$ ) การลดลงของจำนวนเชื้อ *Lb. bulgaricus* และ *S. thermophilus* อาจเป็นเพราะมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตี ( $a_w$ ) ในโยเกิร์ตถ้วยเหลืองผง ทำให้สภาวะไม่เหมาะสมต่อการอยู่รอดของเชื้อทั้งสองชนิดนี้ ทำให้เชื้ออ่อนแอลง

เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อจำนวนเชื้อ *Lb. bulgaricus* และ *S. thermophilus* ของโยเกิร์ตถ้วยเหลืองผง พบว่า การเก็บที่อุณหภูมิ 45°C และ 25°C ให้จำนวนเชื้อ *Lb. bulgaricus* และ *S. thermophilus* ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

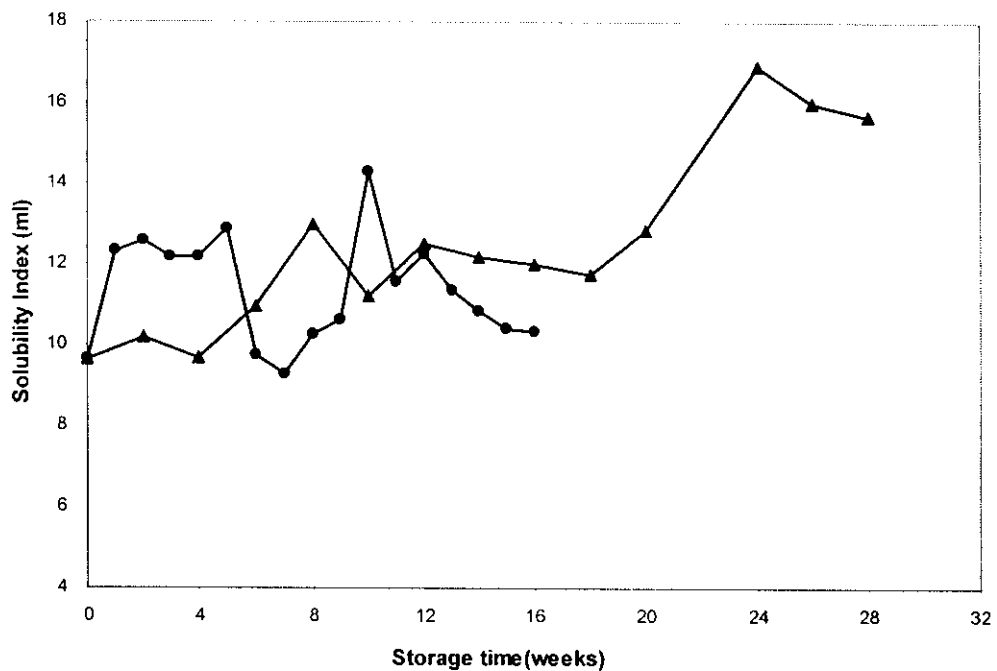


รูปที่ 10 การเปลี่ยนแปลงจำนวนจุลินทรีย์ (a) *Lb. bulgaricus* และ (b) *S. thermophilus* ของโยเกิร์ตถ้วยเหลืองผงในระหว่างการเก็บรักษา

#### 10.4 ค่าดัชนีการละลาย (Solubility Index)

ค่าดัชนีการละลาย เป็นสิ่งบ่งบอกความสามารถในการละลายน้ำของโยเกิร์ตถ้วยเหลืองผง โดยการวัดสัดส่วนของโยเกิร์ตผงที่ใส่ลงไป ในน้ำ ถ้ามีการละลายได้น้อย ค่าของดัชนีก็จะสูง

จากรูปที่ 11 จะเห็นว่า โยเกิร์ตถ้วยเหลืองผงที่เก็บที่อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  ค่าดัชนีการละลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงว่าความสามารถในการละลายน้ำโยเกิร์ตถ้วยเหลืองผงลดลงเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษานานขึ้น ส่วนที่อุณหภูมิ  $45^{\circ}\text{C}$  นั้น ค่าดัชนีการละลายมีแนวโน้มที่ไม่แน่นอน ซึ่งอาจเป็นเพราะอุณหภูมิสูงทำให้โปรตีนเสียสภาพ เกิดการตะกอนและเกิดเจลในบางส่วน รวมทั้งอาจเป็นผลมาจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดปฏิกิริยามอลลาร์ด ซึ่งมีทั้งพอลิเมอร์ที่ละลายและไม่ละลายน้ำ เช่น HMF เกิดพอลิเมอร์ไรซ์ได้เป็นสารสีน้ำตาลที่ไม่ละลายน้ำ



รูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีการละลาย (Solubility Index) ของโยเกิร์ตถ้วยเหลืองผง ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่างๆ; ▲ คือ  $25^{\circ}\text{C}$  และ ● คือ  $45^{\circ}\text{C}$



## การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและเคมีของกากถั่วเหลืองจากโรงงานสกัดน้ำมันและการพัฒนาผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากถั่วเหลือง

### 1. กากถั่วเหลืองจากโรงงานสกัดน้ำมัน

#### 1.1 องค์ประกอบทางเคมีของกากถั่วเหลืองจากโรงงานสกัดน้ำมัน

จากการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบของกากถั่วเหลืองที่ได้รับมาจากบริษัท น้ำมันพืชไทย จำกัด (มหาชน) ทั้งตัวอย่างถั่วเหลืองในประเทศ (นกน) และที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ (นกด) บริษัท อินดัสเตรียล เอ็นเตอร์ไพส จำกัด ทั้งตัวอย่างถั่วเหลืองในประเทศ (อกน) และที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ (อกอ, อกส) และบริษัท ธนากรผลิตภัณฑ์น้ำมันพืช จำกัด ทั้งตัวอย่างถั่วเหลืองในประเทศ (ชกน) และที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ (ชกด) ซึ่งแสดงในตารางที่ 22 พบว่าปริมาณความชื้นของกากถั่วเหลืองอยู่ในช่วง 5.5-9.76 เปอร์เซ็นต์ โดยกากถั่วเหลืองจากสหรัฐอเมริกา ของบริษัท อินดัสเตรียล เอ็นเตอร์ไพส จำกัด (อกส) มีปริมาณความชื้นสูงสุด ส่วนปริมาณความชื้นของกากถั่วเหลืองภายในประเทศจากบริษัท ธนากรผลิตภัณฑ์น้ำมันพืช จำกัด (ชกน) มีค่าต่ำที่สุดคือ 5.50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอาจเป็นผลจากขั้นตอนการอบไล่ความชื้นในการแปรรูป ความแตกต่างภาชนะบรรจุกากถั่วเหลือง วิธีการเก็บรักษา และระยะเวลาในการเก็บกากถั่วเหลืองไว้ อาจเป็นได้ว่า บริษัท ธนากรผลิตภัณฑ์น้ำมันพืช จำกัด สามารถควบคุมการอบไล่ความชื้นจากกากถั่วเหลืองได้ดี รวมทั้งมีการจัดเก็บกากถั่วเหลืองดีกว่าบริษัทอื่นๆ กากถั่วเหลืองที่นำมาวิเคราะห์มีปริมาณโปรตีน 43.65-48.87 เปอร์เซ็นต์ โดยกากถั่วเหลืองภายในประเทศจากบริษัท อินดัสเตรียล เอ็นเตอร์ไพส จำกัด (อกน) มีปริมาณโปรตีนสูงที่สุดคือ 48.87 เปอร์เซ็นต์ และกากถั่วเหลืองจากต่างประเทศของบริษัท ธนากรผลิตภัณฑ์น้ำมันพืช จำกัด (ชกน) มีปริมาณโปรตีนต่ำที่สุดคือ 43.65 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณโปรตีนพบว่ากากถั่วเหลืองภายในประเทศจากทุกบริษัทมีปริมาณโปรตีนสูงกว่ากากถั่วเหลืองจากต่างประเทศ ส่วนปริมาณไขมันในกากถั่วเหลืองมีค่า 0.82-1.74 เปอร์เซ็นต์ โดยกากถั่วเหลืองภายในประเทศจาก บริษัท อินดัสเตรียล เอ็นเตอร์ไพส จำกัด (อกน) มีปริมาณไขมันต่ำที่สุด 0.82 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าการสกัดน้ำมันจากถั่วเหลืองในการผลิตซุคนี้มีประสิทธิภาพดี ได้กากถั่วเหลืองที่มีไขมันต่ำ ส่วนกากถั่วเหลืองจากต่างประเทศของ บริษัท น้ำมันพืชไทย จำกัด (มหาชน)(นกด) มีปริมาณไขมันสูงสุด 1.74 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าขั้นตอนการสกัดน้ำมันมีประสิทธิภาพน้อยกว่า จึงทำให้ไขมันเหลืออยู่ในกากถั่วเหลืองในปริมาณมากกว่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานของกากถั่วเหลืองที่ควรมีไขมัน 0.9-1.0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอาจต้องนำไปสกัดไขมันอีกครั้งถ้าจะนำกากถั่วเหลืองไปบดเป็นแป้งถั่วเหลืองชนิดพร่องไขมัน (defatted soy flour) ที่มีปริมาณไขมันไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ (ประเสริฐ สายสิทธิ์ และคณะ, 2527)

ตารางที่ 22 องค์ประกอบทางเคมีของกากถั่วเหลือง (น้ำหนักแห้ง) ทั้ง 7 ชนิด

| ชนิดกากถั่วเหลือง  | ความชื้น (%) | โปรตีน (%) | ไขมัน (%) | คาร์โบไฮเดรต |           | เถ้า     |           |
|--------------------|--------------|------------|-----------|--------------|-----------|----------|-----------|
|                    |              |            |           | เยื่อใย (%)  | อื่นๆ (%) | ทราย (%) | อื่นๆ (%) |
| นกน <sup>(1)</sup> | 9.68         | 47.09      | 1.05      | 6.89         | 27.81     | 0.80     | 6.68      |
| นกด <sup>(2)</sup> | 9.44         | 44.64      | 1.74      | 8.33         | 28.71     | 0.07     | 7.07      |
| อกน <sup>(3)</sup> | 8.74         | 48.87      | 0.82      | 6.49         | 27.58     | 0.38     | 7.12      |
| อกธ <sup>(4)</sup> | 9.70         | 43.98      | 1.71      | 6.62         | 31.73     | 0.10     | 6.16      |
| อกส <sup>(5)</sup> | 9.76         | 44.20      | 1.34      | 6.11         | 31.87     | 0.06     | 6.67      |
| รกน <sup>(6)</sup> | 5.50         | 45.74      | 1.16      | 6.69         | 33.51     | 0.34     | 7.06      |
| รกด <sup>(7)</sup> | 6.60         | 43.65      | 1.31      | 8.62         | 32.50     | 0.29     | 7.03      |

<sup>(1)</sup> กากถั่วเหลืองภายในประเทศของบริษัท น้ำมันพืชไทย จำกัด (มหาชน)

<sup>(2)</sup> กากถั่วเหลืองจากต่างประเทศของบริษัท น้ำมันพืชไทย จำกัด (มหาชน)

<sup>(3)</sup> กากถั่วเหลืองภายในประเทศของบริษัท อินดัสตรีล เอ็นเตอร์ไพส จำกัด

<sup>(4)</sup> กากถั่วเหลืองอาร์เจนตินาของบริษัท อินดัสตรีล เอ็นเตอร์ไพส จำกัด

<sup>(5)</sup> กากถั่วเหลืองสหรัฐอเมริกาของบริษัท อินดัสตรีล เอ็นเตอร์ไพส จำกัด

<sup>(6)</sup> กากถั่วเหลืองภายในประเทศของบริษัท ธนากร ผลิตภัณฑ์น้ำมันพืช จำกัด

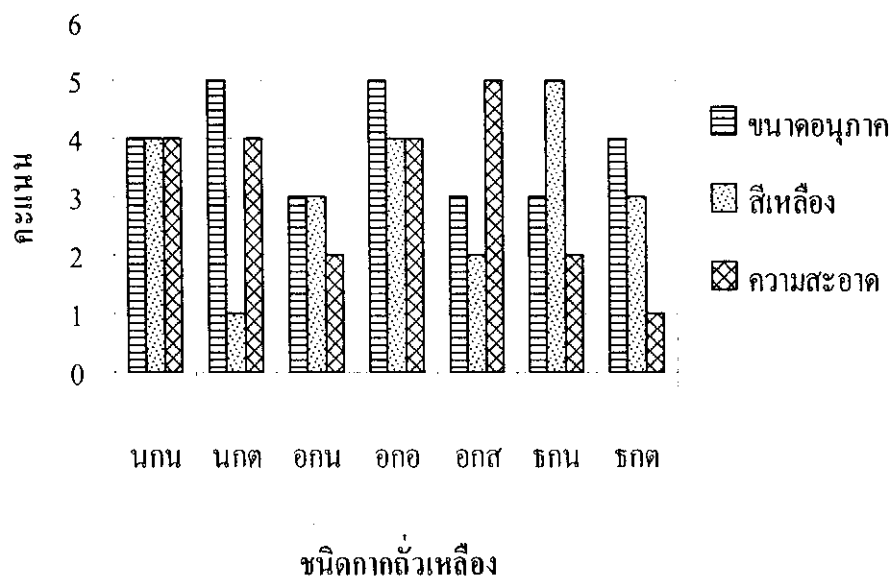
<sup>(7)</sup> กากถั่วเหลืองจากต่างประเทศของบริษัท ธนากร ผลิตภัณฑ์น้ำมันพืช จำกัด

จากการวิเคราะห์ปริมาณเยื่อใยหยาบซึ่งเป็นองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรต ดังตารางที่ 22 พบว่ากากถั่วเหลืองมีเยื่อใยอยู่ประมาณ 6.11-8.62 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับเกณฑ์มาตรฐานของกากถั่วเหลืองที่ควรมีเยื่อใยหยาบประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบถั่วเหลืองทั้งหมดที่ไม่ได้กะเทาะเปลือก 2 พันธุ์ในประเทศ คือ นครสวรรค์ 1 และ เชียงใหม่ 2 มีปริมาณเยื่อใยหยาบ 8.71 เปอร์เซ็นต์ ส่วนถั่วชิกมีเยื่อใยหยาบ 6.90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นปริมาณเดียวกันกับในกากถั่วเหลือง โดยกากถั่วเหลืองจากต่างประเทศของบริษัท ธนากร ผลิตภัณฑ์น้ำมันพืช จำกัด (รกด) มีปริมาณเยื่อใยหยาบสูงสุด 8.62 เปอร์เซ็นต์ ส่วนกากถั่วเหลืองจากสหรัฐอเมริกาของบริษัท อินดัสตรีล เอ็นเตอร์ไพส จำกัด (อกส) มีปริมาณเยื่อใยหยาบต่ำที่สุด 6.11 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้กากถั่วเหลืองมีเถ้าเป็นองค์ประกอบประมาณ 6.26-7.50 เปอร์เซ็นต์ โดยกากถั่วเหลืองภายในประเทศของทุกบริษัทมีเถ้ามากกว่ากากถั่วเหลืองจากต่างประเทศ และปริมาณทรายที่พบได้จากการวิเคราะห์เถ้าของกากถั่วเหลืองทุกชนิดมีค่า 0.06-0.80 เปอร์เซ็นต์ โดยกากถั่วเหลืองภายในประเทศจากบริษัทน้ำมันพืชไทย จำกัด (นกน) มีค่ามากที่สุด คือ 0.80 เปอร์เซ็นต์ ส่วนกากถั่วเหลืองจากสหรัฐอเมริกาของบริษัท อินดัสตรีล เอ็นเตอร์ไพส จำกัด (อกส) มีทรายต่ำที่สุดคือ 0.06 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณทรายของกากถั่วเหลืองในแต่ละบริษัท พบว่ากากถั่ว

เหลืองภายในประเทศมีปริมาณทรายนมากกว่ากากถั่วเหลืองจากต่างประเทศ ดังนั้นถั่วเหลืองภายในประเทศจึงมีการปนเปื้อนมากกว่า แสดงให้เห็นว่าระบบการค้าของถั่วเหลืองภายในประเทศอาจไม่มีขั้นตอนการทำความสะอาดกากถั่วเหลืองก่อนนำไปแปรรูป หรือถ้ามีขั้นตอนนี้ก็แสดงถึงการขาดประสิทธิภาพ จึงทำให้กากถั่วเหลืองภายในประเทศมีการปนเปื้อนของทรายนมากกว่ากากถั่วเหลืองจากต่างประเทศ

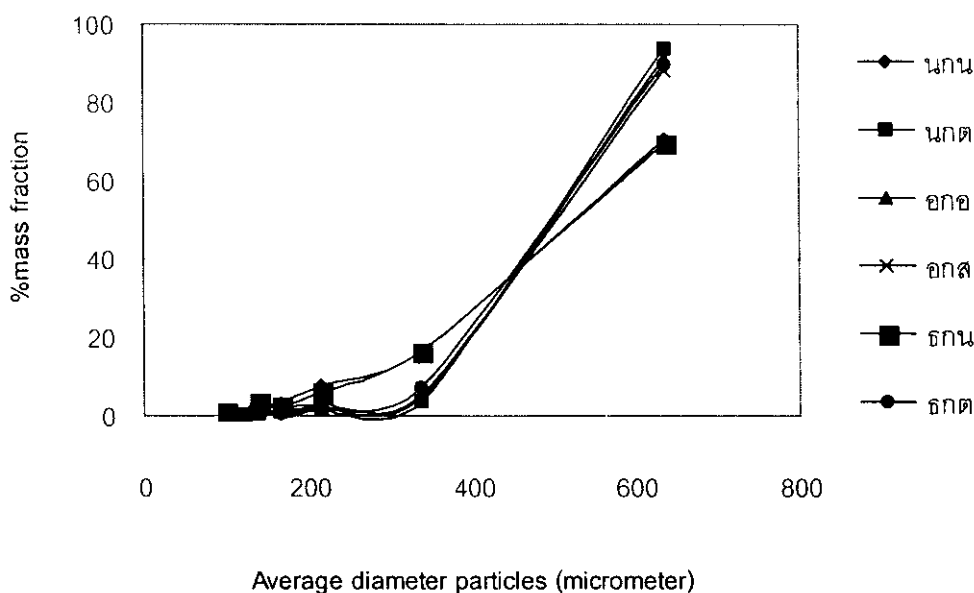
### 1.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของกากถั่วเหลืองจากโรงงานสกัดน้ำมัน

จากการประเมินคุณภาพของกากถั่วเหลืองด้วยตาเปล่าในด้านขนาดอนุภาค สี และความสะอาดของกากถั่วเหลือง ดังรูปที่ 12 พบว่ากากถั่วเหลืองจากบริษัทต่างๆ มีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่ แสดงให้เห็นว่าถ้าจะนำกากถั่วเหลืองเหล่านี้ไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ อาจต้องนำไปบดให้ละเอียดอีกครั้ง สีของกากถั่วเหลืองภายในประเทศจากบริษัท ธนากรผลิตภัณฑ์น้ำมันพืช จำกัด (ชกน) มีคะแนนมากที่สุด แสดงว่ากากถั่วเหลืองมีสีเหลืองมากที่สุด ส่วนกากถั่วเหลืองจากต่างประเทศของบริษัท น้ำมันพืชไทย จำกัด (มหาชน) (นกด) มีสีเหลืองอ่อนที่สุด กากถั่วเหลืองจากสหรัฐอเมริกาของบริษัท อินด์สเตรียล เอ็นเตอร์ไพส์ จำกัด (อกส) มีเศษผงปะปนอยู่ในกากมากที่สุด และกากถั่วเหลืองจากต่างประเทศของบริษัท ธนากรผลิตภัณฑ์น้ำมันพืช จำกัด (ชกต) มีเศษผงปะปนน้อยที่สุด อาจแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการทำความสะอาดและการคัดแยกสิ่งปนเปื้อนก่อนนำถั่วเหลืองเข้าสู่กระบวนการแปรรูปหรือการปนเปื้อนในระหว่างการแปรรูป



รูปที่ 12 ลักษณะทางกายภาพของกากถั่วเหลืองทั้ง 7 ชนิด

จากผลการตรวจสอบการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของกากถั่วเหลืองที่ได้รับจากบริษัททั้งสาม ดังแสดงในรูปที่ 13 พบว่าขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยของกากถั่วเหลืองส่วนใหญ่ ประมาณ 70.69-93.43 เปอร์เซ็นต์ คือขนาด 637.5 ไมโครเมตร ซึ่งจัดเป็นขนาดอนุภาคที่ใหญ่ที่สุด โดยสอดคล้องกับผลจากการสังเกตขนาดอนุภาคของกากถั่วเหลืองด้วยตาเปล่าข้างต้น ที่พบว่ากากถั่วเหลืองส่วนมากมีอนุภาคใหญ่ นอกจากนี้ยังพบว่ากากถั่วเหลืองจากต่างประเทศของบริษัท น้ำมันพืชไทย จำกัด (มหาชน) (นกด) มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้อย โดยอนุภาคขนาดใหญ่ที่ 637.5 ไมโครเมตร ถึง 93.43 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจัดเป็นปริมาณที่มากที่สุดในการกากถั่วเหลืองทั้งหมดที่นำมาวิเคราะห์ ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่านั้นมีปริมาณน้อยเพียง 6.57 เปอร์เซ็นต์ และพบว่ากากถั่วเหลืองภายในประเทศที่ได้รับมาจาก บริษัท น้ำมันพืชไทย จำกัด (มหาชน) (นกน) และบริษัท ธนากรผลิตภัณฑ์น้ำมันพืช จำกัด (ชกน) มีการกระจายตัวของอนุภาคค่อนข้างดีกว่ากากถั่วเหลืองชนิดอื่นๆ



รูปที่ 13 การกระจายตัวของกากถั่วเหลืองทั้ง 7 ชนิดที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ

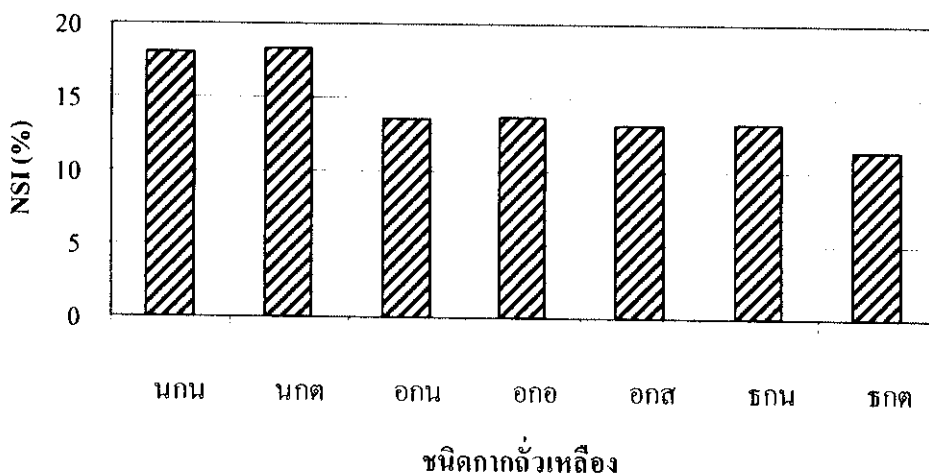
จากการวัดสีของกากถั่วเหลืองด้วย Hunter colorimeter ที่แสดงค่าความสว่าง (L) ค่าสีน้ำเงิน-แดง (a) ค่าสีเขียว-เหลือง (b) ดังแสดงในตารางที่ 23 พบว่ากากถั่วเหลืองมีค่า L ประมาณ 65.41-74.45 โดยกากถั่วเหลืองจากภายในประเทศของบริษัท ธนากรผลิตภัณฑ์น้ำมันพืช จำกัด มีค่า L ต่ำที่สุดคือ 65.41 แสดงว่ากากถั่วเหลืองมีความสว่างน้อยที่สุด ส่วนกากถั่วเหลืองจากสหรัฐอเมริกาของบริษัท อินดัสตรีล เอ็นเตอร์ไพส จำกัด (อกส) มีค่า L มากที่สุดคือ 74.45 แสดงว่ากากถั่วเหลืองมีความสว่างมากที่สุด และพบว่ากากถั่วเหลืองภายในประเทศมีค่าความสว่างน้อยกว่ากากถั่วเหลืองจากต่างประเทศเมื่อเปรียบเทียบกับภายในบริษัทเดียวกัน กากถั่วเหลืองมีค่าสีน้ำเงิน-แดง (a) มีค่า (-) 0.66

ถึง (+) 1.97 โดยกากถั่วเหลืองภายในประเทศจากบริษัท อินด์สเตรียล เอ็นเตอร์ไพส จำกัด (อกน) มีค่า a เป็น (+) 1.97 จึงมีสีแดงมากกว่ากากถั่วเหลืองชนิดอื่นๆ ค่าสีเขียวเหลือง (b) ของกากถั่วเหลืองมีค่า (+) 28.85 ถึง (+) 32.6 โดยค่าที่เป็นบวก หมายถึง สีเหลือง ซึ่งพบว่ากากถั่วเหลืองจากสหรัฐอเมริกาของบริษัท อินด์สเตรียล เอ็นเตอร์ไพส จำกัด (อกส) มีสีเหลืองมากกว่าบริษัทอื่นๆ ส่วนกากถั่วเหลืองภายในประเทศจากบริษัท น้ำมันพืชไทย จำกัด (มหาชน) (นกน) มีสีเหลืองน้อยที่สุด

ตารางที่ 23 สีของกากถั่วเหลืองทั้ง 7 ชนิด

| ชนิดกากถั่วเหลือง | L     | a        | b         |
|-------------------|-------|----------|-----------|
| นกน               | 69.88 | (+) 0.36 | (+) 28.85 |
| นกด               | 71.40 | (-) 0.66 | (+) 30.60 |
| อกน               | 68.30 | (+) 1.97 | (+) 30.05 |
| อกอ               | 72.59 | (+) 1.14 | (+) 31.52 |
| อกส               | 74.45 | (+) 0.47 | (+) 32.60 |
| ชกน               | 65.41 | (+) 1.12 | (+) 29.28 |
| ชกด               | 65.47 | (+) 0.42 | (+) 28.92 |

จากการวิเคราะห์ค่าดัชนีความสามารถในการละลายของไนโตรเจน (NSI) ของกากถั่วเหลือง ดังรูปที่ 14 สามารถนำมาใช้เป็นดัชนีบ่งบอกความเสียหายของโปรตีนเนื่องจากกระบวนการสกัดน้ำมัน และยังมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนถั่วเหลือง ซึ่งมีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร โดยกากถั่วเหลืองที่นำมาวิเคราะห์มีค่า NSI 11.39-18.29 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจัดว่ามีค่าต่ำมาก แสดงว่าโปรตีนได้รับความร้อนสูงในกระบวนการสกัดน้ำมันจึงทำให้โปรตีนเกิดการสูญเสียสภาพทางธรรมชาติไปมาก โดยอาจได้รับความร้อนในขั้นตอนการให้ความร้อนแบบย่าง (toasting) เพื่อทำลายทริปซิน อินฮิบิเตอร์ (trypsin inhibitor) และกำจัดตัวทำละลายออกแล้วนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ โดยกากถั่วเหลืองภายในประเทศและต่างประเทศของบริษัทน้ำมันพืชไทย จำกัด (มหาชน) (นกน และ นกด) มีค่า NSI มากกว่าบริษัทอื่นๆ คือ 18.06 และ 18.29 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนกากถั่วเหลืองจากต่างประเทศของบริษัท ธนากรผลิตภัณฑ์น้ำมันพืช จำกัด มีค่า NSI ต่ำที่สุด คือ 11.39 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่ากากถั่วเหลืองเหล่านี้เหมาะสมต่อการนำไปเป็นอาหารสัตว์มากกว่านำมาแปรรูปเป็นอาหารมนุษย์ ดังนั้นในการที่จะนำกากถั่วเหลืองจากโรงงานสกัดน้ำมันถั่วเหลืองภายในประเทศ มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเนื้อเทียมจึงมีศักยภาพน้อยมาก เนื่องจากสมบัติเชิงหน้าที่ด้านความสามารถในการละลายของไนโตรเจนมีค่าต่ำมาก แม้ว่ากากถั่วเหลืองเหล่านี้จะมีโปรตีนสูง และหากสามารถมีขั้นตอนการทำความสะอาดถั่วเหลืองให้สะอาดขึ้นได้



รูปที่ 14 คชึนความสามารถในการละลายของไนโตรเจนของกากั่วเหลืองทึง 7 ชนิด

## 2. สมบัติเชิงหน้าทึงของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด

จากผลการวัดปริมาณโปรตีนของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด ทึง 5 ชนิด ได้แก่ Dragon Cloud EMS, Supro 515IP, Supro 500E, Supro 516 และ Profam 974 พบว่ามีปริมาณโปรตีนประมาณ 88-94 เปอร์เซ็นต์ โดยโปรตีนถั่วเหลืองสกัดชนิด Supro 515IP มีปริมาณโปรตีนสูงสุด ส่วนโปรตีนถั่วเหลืองสกัดชนิด Supro 516 มีปริมาณโปรตีนต่ำที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 24 จากการวัดค่า NSI ของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดดังตารางที่ 25 พบว่าโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีค่า NSI ในช่วง 33.05-100 เปอร์เซ็นต์ โดยโปรตีนถั่วเหลืองสกัดชนิด Profam 974 มีค่า NSI สูงสุด คือ 100 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าเป็นโปรตีนที่มีคุณภาพที่ดีมาก ส่วนโปรตีนถั่วเหลืองสกัดชนิด Supro 516 มีค่า NSI ต่ำที่สุดคือ 33.05 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าโปรตีนส่วนใหญ่เสียสภาพทางธรรมชาติเนื่องจากได้รับความร้อนสูงในการแปรรูป ซึ่งสอดคล้องกับผลความสามารถในการละลายของโปรตีน ที่พบว่าโปรตีนถั่วเหลืองสกัดชนิด Profam 974 มีความสามารถในการละลายมากที่สุด คือ 54.38 เปอร์เซ็นต์ ส่วนโปรตีนถั่วเหลืองสกัดชนิด Supro 516 มีความสามารถในการละลายต่ำที่สุด คือ 25.01 เปอร์เซ็นต์ โดยโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีความหนืดของเจลที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ มีค่า 631-3,075 centipoises โดยโปรตีนถั่วเหลืองสกัดชนิด Supro 500E มีความหนืดสูงสุด ส่วนโปรตีนถั่วเหลืองสกัดชนิด Supro 515IP มีความหนืดต่ำสุด ซึ่งสมบัติทางด้านความหนืดนี้เป็นสมบัติที่มีความสำคัญต่อระบบของอาหาร จึงนำไปสู่การคัดเลือกโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เหมาะสมเพื่อนำไปปรับใช้ให้ตรงต่อความต้องการของแต่ละผลิตภัณฑ์อาหารได้

ตารางที่ 24 องค์ประกอบทางเคมีของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดทั้ง 5 ชนิด

| Type             | Moisture content<br>(%) | Protein content<br>(%) |
|------------------|-------------------------|------------------------|
| Dragon Cloud EMS | 4.70                    | 92.45                  |
| Supro 515IP      | 4.08                    | 93.54                  |
| Supro 500E       | 3.31                    | 89.91                  |
| Supro 516        | 4.51                    | 87.95                  |
| Profam 974       | 4.62                    | 89.06                  |

ตารางที่ 25 สมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดทั้ง 5 ชนิด

| Type             | NSI<br>(%) | Solubility<br>(%) | Gel viscosity<br>(centipoises) |
|------------------|------------|-------------------|--------------------------------|
| Dragon Cloud EMS | 52.04      | 28.33             | 1,152                          |
| Supro 515IP      | 99.86      | 30.87             | 631                            |
| Supro 500E       | 98.20      | 47.74             | 3,075                          |
| Supro 516        | 33.05      | 25.01             | 1,006                          |
| Profam 974       | 100.00     | 54.38             | 1,450                          |

### 3. เนื้อเทียม

#### 3.1 ผลการศึกษาสถานะการแปรรูปด้วยการเอกซ์ทรูชันเบื้องต้น

จากการศึกษาสถานะเบื้องต้นเพื่อหาช่วงระดับในการแปรรูปของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ โดยใช้วัตถุดิบที่เป็นส่วนผสมระหว่าง DSF และ SPI ในอัตราส่วน 70 ต่อ 30 เปอร์เซ็นต์ พบว่าที่ อัตราการป้อนวัตถุดิบ 65 กรัมต่อนาที ความชื้นของวัตถุดิบ 30 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วรอบสกรู 250 รอบต่อนาที และอุณหภูมิของบาริลช่วงที่ 1 ถึงช่วงที่ 4 เป็น 60, 90, 140 และ 160 องศาเซลเซียส เป็นสถานะที่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมได้โดยสามารถดำเนินเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ได้อย่างราบรื่น ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่ได้มีลักษณะทางกายภาพที่ดี ผิวหน้าเรียบ เอกซ์ทรูเดตเกิดการขยายตัวเมื่อผ่านออกจากหน้าแปลน

## 3.2 ผลของปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัด

### 3.2.1 พันธเคมี

การศึกษาความสามารถในการละลายของโปรตีนในตัวทำละลายบางชนิด สามารถบ่งชี้ถึงชนิดของพันธเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของโปรตีน (intermolecular chemical linkages) และพันธเคมีภายในโมเลกุลโปรตีน (intramolecular chemical linkages) ได้ โดยสารเคมีที่นำมาใช้ได้แก่ ยูเรีย โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต และเมอแคปโทเอธานอล ซึ่งสามารถทำลายพันธะไฮโดรเจน แรงดึงดูดไฮโดรโฟบิก และพันธะไดซัลไฟด์ระหว่างโมเลกุลของโปรตีนได้ตามลำดับ จากการศึกษาชนิดพันธเคมีที่เชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลโปรตีนในเนื้อเทียม พบว่าพันธะไดซัลไฟด์ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจนเป็นพันธเคมีที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของโปรตีนในเนื้อเทียม ซึ่งเห็นได้ในตารางที่ 26 ที่พบว่าเนื้อเทียมที่มี SPI เป็นส่วนผสมที่ระดับ 20, 40, 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ใน P+S+M และ P+U+M มีค่าสูงกว่าปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ชนิดอื่นๆอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ในบัฟเฟอร์ชนิดอื่นๆของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมทุกชนิด มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) แสดงว่าทั้งพันธะไดซัลไฟด์ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจน เป็นพันธะที่มีบทบาทต่อการเกิดโครงสร้างในเนื้อเทียม ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Hager (1984) และ Prudêncio-Ferreira และ Arêas (1993) ที่พบว่าพันธะไดซัลไฟด์ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิกและแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต เป็นพันธะทางเคมีที่มีส่วนสนับสนุนโครงสร้างของโปรตีนถั่วเหลืองในเอกซ์ทรูเดตที่ผ่านเอกซ์ทรูชัน นอกจากนี้ยังพบว่าพันธเคมีที่พบในโมเลกุลโปรตีนของวัตถุดิบเป็นพันธเคมีชนิดเดียวกันกับพันธเคมีที่เชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลโปรตีนในเนื้อเทียม ได้แก่ พันธะไดซัลไฟด์ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจน ซึ่งสังเกตได้จากวัตถุดิบทุกชนิดมีปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ใน P+Urea, P+SDS, P+ME และ P+S+U ใน P+Urea, P+SDS, P+ME และ P+S+U ที่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ดังแสดงในตารางที่ 27 แสดงให้เห็นว่าการเอกซ์ทรูชันไม่มีผลเปลี่ยนแปลงชนิดของพันธเคมีในผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมให้แตกต่างไปจากวัตถุดิบ



ตารางที่ 26 ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ (กรัม/กรัม โปรตีน) ของเนื้อเยื่อที่มีโปรตีนถั่วเหลืองสกัด 20-80 เปอร์เซ็นต์ ในตัวทำละลาย 7 ชนิด

| Type/<br>Buffer | P <sup>(1)</sup>                           | P+SDS <sup>(2)</sup> | P+Urea <sup>(3)</sup> | P+M <sup>(4)</sup> | P+S+U <sup>(5)</sup> | P+S+M <sup>(6)</sup> | P+U+M <sup>(7)</sup> |
|-----------------|--|----------------------|-----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 20%SPI          | 0.0816xy <sup>(8)</sup> , Y <sup>(9)</sup> | 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             |

<sup>(1)</sup> หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

<sup>(2)</sup> หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต

<sup>(3)</sup> หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มียูเรีย

<sup>(4)</sup> หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีเมอแคปโทเอทานอล

<sup>(5)</sup> หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มียูเรียและ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต

<sup>(6)</sup> หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มี โซเดียมโดเดซิลซัลเฟตและเมอแคปโทเอทานอล

<sup>(7)</sup> หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มียูเรีย และเมอแคปโทเอทานอล

<sup>(8)</sup> ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

<sup>(9)</sup> ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

ตารางที่ 27 ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ (กรัม/กรัม โปรตีน) ของวัตถุคิบที่มีโปรตีนถั่วเหลืองสกัด 20-80 เปอร์เซ็นต์ ในตัวทำละลาย 7 ชนิด

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

<sup>(1)</sup> ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันตามแนวนอน หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

<sup>(2)</sup> ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

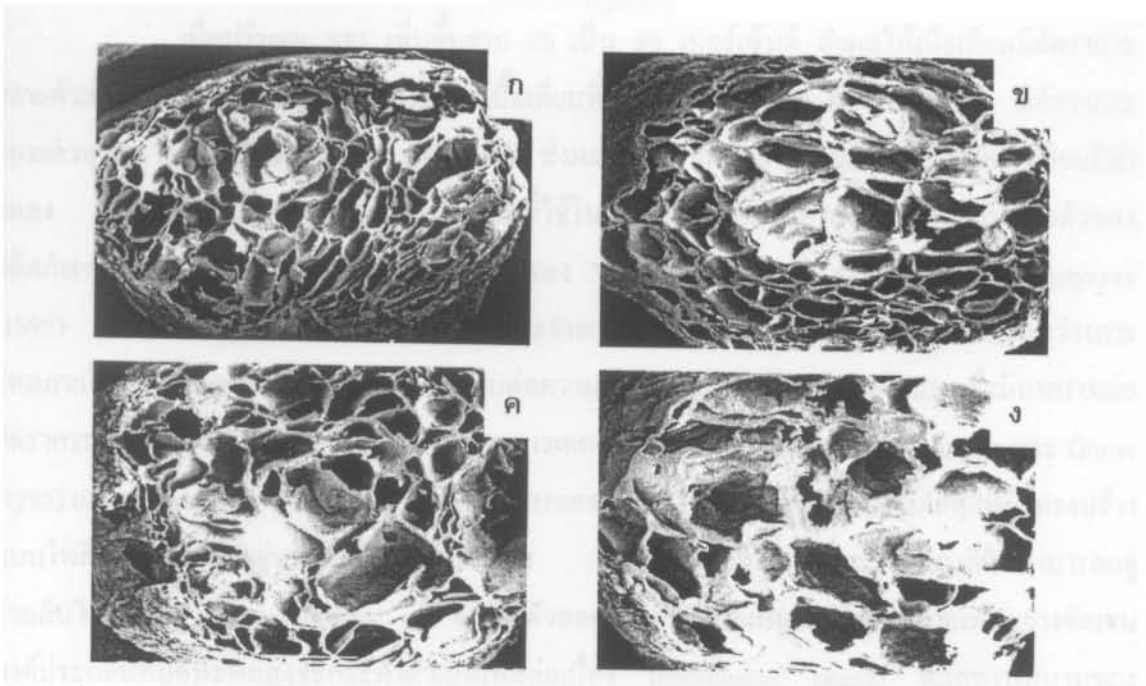
เมื่อศึกษาผลของปริมาณ SPI ต่อการสร้างพันธะเคมีในเนื้อเทียม ดังแสดงในตารางที่ 26 บ่งชี้ว่าการเพิ่มปริมาณ SPI ในเนื้อเทียม ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับของพันธะเคมีที่เชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลโปรตีน ได้แก่ พันธะไดซัลไฟด์ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างของโปรตีนที่แตกต่างไปจากเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของ 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 24 แสดงว่าปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อระดับพันธะเคมีที่เชื่อมโยงในโมเลกุลโปรตีนในวัตถุดิบ

จากผลการทดลองในตารางที่ 26 พบว่าปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่มีปริมาณ SPI ที่ระดับ 20, 40, 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ มีค่าต่ำกว่าของวัตถุดิบที่มี SPI ในระดับเดียวกัน (ตารางที่ 27) เมื่อสกัดด้วย P, P+SDS, P+Urea, P+ME, P+S+U อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p<0.05$ ) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่โปรตีนที่สูญเสียสภาพทางธรรมชาติมาจัดเรียงตัวในรูปแบบใหม่ เกิดเป็นโครงสร้างโปรตีนที่มีความซับซ้อนมากกว่าเดิม (Smith, 1982) ส่งผลให้ความสามารถในการละลายของโปรตีนในสารตัวทำละลายลดลง ซึ่งทำให้ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมมีค่าลดลง (Jeunink, and Cheftel, 1979; Noguchi, Kugimiya, Haque, and Saio, 1981) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Lin และคณะ (2000) ที่รายงานว่า การเอกซ์ทรูชันของโปรตีนถั่วเหลืองอาจเกิดโพสโสมอร์ฟอลโมเลกุลสูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการละลายของโปรตีนลดลง แต่ทั้งนี้พบว่าปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ของเนื้อเทียมแต่ละสูตรที่สกัดด้วย P+S+M และ P+U+M มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับของวัตถุดิบ ( $p>0.05$ )

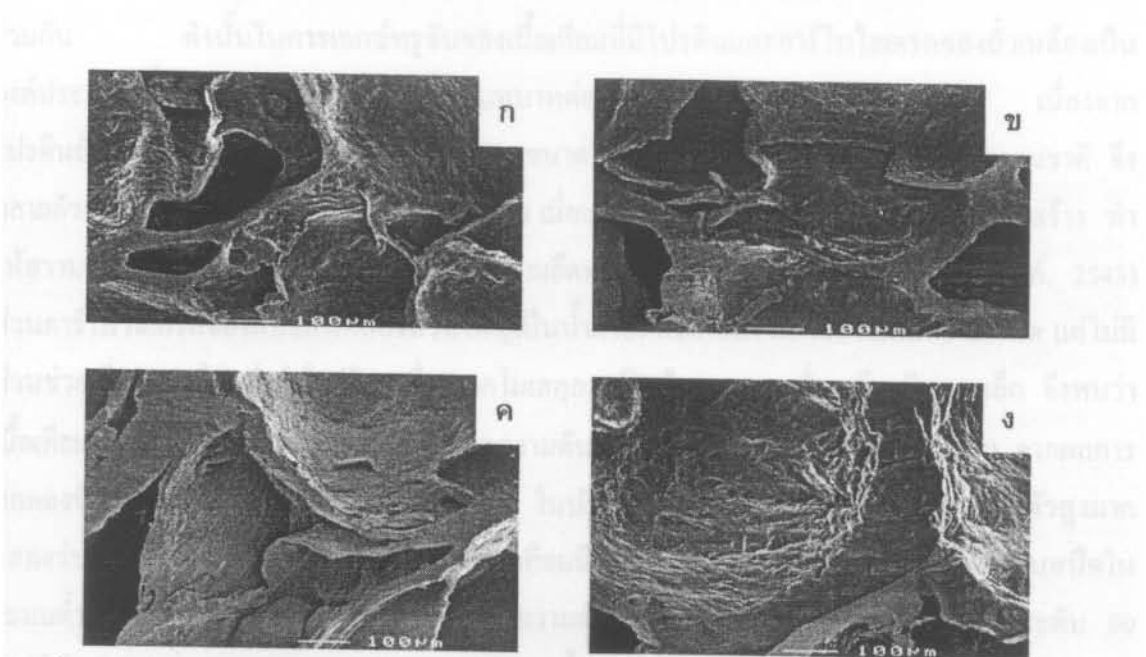
### 3.2.2 ลักษณะโครงสร้างภายใน

จากการศึกษาโครงสร้างภายในของชิ้นเนื้อเทียม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่แสดงในรูปที่ 15 ก-ง และรูปที่ 16 ก-ง พบว่าเนื้อเทียมที่เติม SPI 20 เปอร์เซ็นต์ในรูปที่ 15 ก มีลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างแบบชั้นวงคล้ายรังผึ้ง (honeycomb structure) ที่มีช่องรูพรุนขนาดเล็กและใหญ่กระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอ พบรูพรุนบาง ผิวเรียบสม่ำเสมอและไม่ขรุขระ ที่ผิวหน้าของช่องรูพรุนปรากฏริ้วเส้นใยเล็กๆที่ละเอียด ซึ่งเห็นได้จากรูปที่ 16 ก การเติม SPI ในวัตถุดิบเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของเอกซ์ทรูเดต โดยทำให้ลักษณะการจัดเรียงตัวเป็นชั้นวงคล้ายรังผึ้งภายในโครงสร้างของชิ้นเนื้อเทียมเปลี่ยนแปลงไป โดยพบว่าโครงสร้าง

ภายในของเนื้อเทียมที่มีปริมาณ SPI เพิ่มขึ้นเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ มีจำนวนรูพรุนลดลง ขนาดของช่องรูพรุนใหญ่ขึ้น และเกิดลักษณะโครงสร้างคล้ายฟองน้ำ (spongy-like structure) ผนังของรูพรุนหนาขึ้นมาก ผิวหน้าไม่เรียบขรุขระและเว้าแหว่งมากขึ้นดังรูปที่ 15 ง และมีลักษณะของเส้นใยเล็กๆ ที่ผิวหน้าของช่องรูพรุนน้อยดังรูปที่ 16 ง ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับผลงานวิจัยของ Sheard และคณะ (1984) ที่พบว่าเอกซทรูเดตของ DSF มีโครงสร้างภายในคล้ายรังผึ้งที่มีรูปร่างและการกระจายตัวของโพรงอากาศ (air cell) เป็นปกติและสม่ำเสมอมากกว่าเอกซทรูเดตของ SPI แสดงว่าปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองมีผลต่อลักษณะโครงสร้างภายในของเนื้อเทียม โดย Harper (1981) รายงานว่าเมื่อโมเลกุลของโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และอนุภาคขององค์ประกอบอื่นๆ ได้รับความร้อน และความดันในกระบวนการเอกซทรูชัน จะเกิดการแตกแยกตัวออกจากโครงสร้างและมาจัดเรียงตัวในสภาวะแรงเฉือน ทั้งนี้โมเลกุลสายยาวของโปรตีนที่มาเรียงตัวต่อเนื่องกันนั้น ก่อให้เกิดลักษณะโครงสร้างร่างแหแบบตาข่าย 3 มิติขึ้น (three dimension protein matrix structure) ซึ่งจัดเป็นโครงสร้างหลักของผลิตภัณฑ์ที่พบในรูปแบบของเส้นใยที่มีช่องรูพรุนกระจายตัวอยู่ และจากการศึกษาโครงสร้างภายในของเอกซทรูเดตของ Kazemzadeh, Aguilera และ Rhee (1982) ด้วยการส่องดูโมเลกุลของโปรตีน และ คาร์โบไฮเดรตที่ผ่านการย้อมสีด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง พบว่าโมเลกุลสายยาวของโปรตีนปิดล้อมช่องว่างในโครงสร้างที่เป็นผลจากการดันตัวออกของไอน้ำ โดยที่คาร์โบไฮเดรตฝังตัวอยู่ในโครงสร้างแบบร่างแหของโปรตีนที่เป็นเส้นใย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Noguchi (1989) ที่ตรวจสอบโครงสร้างของเอกซทรูเดตของเนื้อปลาซั่มแซลมอน (chum salmon muscle) และแป้งสาลี โดยการย้อมสีโปรตีนและคาร์โบไฮเดรต ด้วย Coomassie Brilliant Blue และ Periodic Acid Schiff Reagent แล้วส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง พบว่ากระบวนการเอกซทรูชันส่งผลให้โมเลกุลโปรตีนเกิดจัดเรียงตัวในทิศทางตามแนวยาวของบาริล โดยเกิดเป็นโครงสร้างเส้นใยร่างแหคล้ายกล้านเนื้อสัตว์ส่วนสัตว์ได้กระจายตัวตามโครงสร้างแบบร่างแหของโปรตีนโดยที่ไม่ได้เข้าร่วมเป็นส่วนหนึ่งของเส้นใยของโปรตีน แต่เกิดเป็นลักษณะของเฟสสองเฟสที่แยกตัวออกจากกันอย่างสิ้นเชิง แสดงให้เห็นว่าการที่โปรตีนถั่วเหลืองสูญเสียสภาพดั้งเดิมจากลักษณะโปรตีนแบบก้อนกลม เกิดการคลายตัวออกเป็นโมเลกุลสายยาวมาเรียงตัวใกล้ชิดกัน ซึ่งกลายเป็นโครงสร้างหลักของเนื้อเทียม ส่วนคาร์โบไฮเดรตถั่วเหลืองที่เกิดการหลอมละลายได้กระจายตัวไปเกาะตามส่วนต่างๆ ของโครงสร้างหลักของเนื้อเทียม



รูปที่ 15 ภาพถ่ายตามขวาง ที่กำลังขยาย 17 เท่า (ก, ข, ค, ง) ของเนื้อเทียมที่เติม โปรตีนถั่วเหลืองสกัด 20, 40, 60 และ 80% ตามลำดับ



รูปที่ 16 ภาพถ่ายตามขวางที่ กำลังขยาย 120 เท่า (ก, ข, ค, ง) ของเนื้อเทียมที่เติม โปรตีนถั่วเหลืองสกัด 20, 40, 60 และ 80% ตามลำดับ

### 3.2.3 ลักษณะทางกายภาพ

เมื่อปริมาณ SPI เพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 80 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้เนื้อเทียมมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นมากซึ่งแสดงในตารางที่ 28 เนื้อเทียมที่เติม SPI ในระดับ 80 เปอร์เซ็นต์ มีอัตราการขยายตัวสูงสุด ( $p < 0.05$ ) เมื่อปริมาณ SPI ลดลง ส่งผลให้อัตราการขยายตัวของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมมีค่าลดลง แสดงว่าองค์ประกอบในวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเนื้อเทียมส่งผลต่ออัตราการขยายตัวของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมเป็นอย่างมาก จากการศึกษาของ Yuryev, Zasyupkin, Alexeev และ Bogatyryev (1995) พบว่าการสูญเสียโครงสร้างของเฟสกระจายเนื่องจากความเครียดของการเลื่อนในระหว่างการไหลภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ส่งผลกระทบต่อความเหนียวและความยืดหยุ่นของระบบซึ่งมีบทบาทต่ออัตราการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน โดย Tolstoguzov, Grinberg และ Gurov (1985) และ Tolstoguzov (1993) กล่าวว่าในระบบของเอกซ์ทรูชันที่ประกอบด้วย โมเลกุลที่มีโครงสร้างแบบโพลีเมอร์ขนาดใหญ่หลายชนิดมาอยู่ร่วมกัน ก่อให้เกิดลักษณะ โครงสร้างแบบที่ไม่สามารถอยู่ร่วมกันได้ (incompatibility) จึงแยกตัวออกจากกันกลายเป็นระบบที่มีหลายเฟสอย่างชัดเจน องค์ประกอบที่มีอิทธิพลสูงจะกระทำตัวเป็นเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) ที่แสดงบทบาทของโครงสร้างหลักของผลิตภัณฑ์ ส่วนองค์ประกอบอื่นๆ ที่มีปริมาณน้อยกว่า กลายเป็นเฟสกระจาย (dispersed phase) ที่อยู่ตามส่วนต่างๆ ของโครงสร้างหลัก ซึ่งส่งผลต่อลักษณะโดยรวมของผลิตภัณฑ์ร่วมกัน ดังนั้นในการเอกซ์ทรูชันของเนื้อเทียมที่มีโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตของถั่วเหลืองเป็นองค์ประกอบนั้น พบว่าโปรตีนถั่วเหลืองมีบทบาทต่อความเหนียวและความยืดหยุ่นของโค เนื่องจากโปรตีนถั่วเหลืองเป็นไบโอโพลีเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เมื่อเกิดการสูญเสียสภาพทางธรรมชาติ จึงคลายตัวออกเป็นโปรตีนที่มีโมเลกุลแบบสายยาว เมื่อเกาะตัวรวมตัวกันจึงขับน้ำออกจากโครงสร้าง ทำให้ความเหนียวของระบบลดลง แต่ส่งผลให้ความยืดหยุ่นของโคเพิ่มขึ้น (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2543) ส่วนคาร์โบไฮเดรตของแป้งถั่วเหลืองส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลที่ละลายน้ำได้ จึงช่วยเพิ่มความเหนียว แต่ไม่มีส่วนช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่โค เนื่องจากโมเลกุลคาร์โบไฮเดรตของถั่วเหลืองมีขนาดเล็ก จึงพบว่าเนื้อเทียมที่มี SPI ในปริมาณต่ำมีค่าทอร์คและความดันที่หัวแบบสูง ( $p < 0.05$ ) (ตารางที่ 28) จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเนื้อเทียมที่มี SPI ในปริมาณสูงเป็นส่วนผสม มีอัตราการขยายตัวสูงมาก แสดงว่าโปรตีนถั่วเหลืองส่งเสริมให้โคของเนื้อเทียมมีสมบัติด้านความยืดหยุ่นสูง แต่มีความเหนียวในระบบต่ำ ซึ่งสังเกตได้จากการที่ค่าทอร์คและความดันที่หัวแบบของเนื้อเทียมที่มี SPI ในระดับ 80 เปอร์เซ็นต์ มีค่าต่ำมาก ( $p < 0.05$ ) ส่งผลให้โคของเนื้อเทียมสามารถขยายตัวออกจากกันได้มากหลังผ่านหัวแบบออกสู่ภายนอก ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Rhee และคณะ (1981) พบว่าเนื้อเทียมที่มีปริมาณ SPI เพิ่มขึ้น มีความหนาแน่นจำเพาะลดลงเนื่องจากเนื้อเทียมมีการขยายตัวเพิ่มขึ้น และ Bhattacharya และ Hanna (1988) พบว่าเมื่อเติมโปรตีนถั่วเหลืองเข้มข้นในกลูเตนข้าวโพคในปริมาณมากขึ้น ทำให้เอกซ์ทรูเดตมีอัตราการขยายตัวสูงขึ้น ส่วนเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของ SPI ในปริมาณต่ำมีอัตราการขยายตัวต่ำ เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนน้อยและอาจเป็นผลมาจากคาร์โบไฮเดรตถั่วเหลืองที่มี

อยู่ในวัตถุดิบเกิดการหลอมละลาย เนื่องจากได้รับความร้อนและความชื้น จึงกระจายตัวตามไปเกาะตามโครงสร้างแบบร่างแหของโปรตีน ทำให้โมเลกุลของโปรตีนถูกยึดติดเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งอาจไปขัดขวางการยืดขยายตัวของโปรตีน จนทำให้ความยืดหยุ่นของโคเลตลง และส่งผลให้อัศจรรย์การขยายตัวของเนื้อเทียมลดลง

ตารางที่ 28 ตัวแปรของกระบวนการเอกซ์ทรูชันและลักษณะทางกายภาพของเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดในระดับ 20-80 เปอร์เซ็นต์

| Parameters and Characteristics | Soy protein isolate (%) |         |         |         |
|--------------------------------|-------------------------|---------|---------|---------|
|                                | 20                      | 40      | 60      | 80      |
| Torque (%)                     | 30.0ab <sup>(1)</sup>   | 36.00a  | 35.00ab | 28.33b  |
| Die pressure (psi)             | 183.33a                 | 193.33a | 196.67a | 116.67b |
| Expansion ratio                | 2.01d                   | 2.24c   | 2.35b   | 2.61a   |
| Stress (g/cm <sup>2</sup> )    | 2,477a                  | 2,185ab | 2,034b  | 1,446c  |
| Textural appearance score      |                         |         |         |         |
| -Tearing                       | 6.61a                   | 4.55b   | 2.03c   | 1.38c   |
| -Fibrousness                   | 5.36a                   | 3.85b   | 1.99c   | 1.31c   |

<sup>(1)</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวอนหมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

เมื่อศึกษาผลของปริมาณ SPI ต่อการสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียม โดยการวัดความเครียดของเนื้อเทียม ซึ่งคำนวณมาจากแรงที่ใช้ในการตัดเนื้อเทียมให้ขาดออกจากกันต่อพื้นที่หน้าตัดของเนื้อเทียม จึงสามารถใช้แสดงถึงความแข็งแรงของเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียม โดยวัดความเครียดของเนื้อเทียมที่มีความชื้น 80 เปอร์เซ็นต์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสโดยใช้หัววัดแบบ Warner-Bratzler shear cell ดังแสดงในตารางที่ 26 พบว่าเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมที่เติม SPI ในระดับ 20 เปอร์เซ็นต์ มีความเครียดสูงสุด ( $p < 0.05$ ) แสดงว่าเนื้อเทียมมีเนื้อสัมผัสที่แข็งแรง เมื่อเติม SPI เพิ่มขึ้น ทำให้เนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมมีความเครียดลดลง เป็นผลมาจากการที่เนื้อเทียมที่มีปริมาณ SPI สูง มีอัตราการขยายตัวสูง (ตารางที่ 26) เนื้อเทียมเกิดการขยายตัวออกจากกันในแนวรัศมีมาก มีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 15ง โครงสร้างของเนื้อเทียมเกาะตัวกันอย่างหลวมๆ และไม่แน่นอนส่งผลให้เนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมที่มีปริมาณ SPI สูงมีความแข็งแรงน้อย ส่วนเนื้อเทียมที่มี SPI เป็นส่วนผสมในปริมาณต่ำเกิดการขยายตัวน้อย เนื่องจากมีโปรตีนที่ให้สมบัติในการยืดขยายตัวในปริมาณน้อย และมีคาร์โบไฮเดรตไปตรึงโครงสร้างของโปรตีนไว้ไม่ให้ขยายตัวออก โครงสร้างของผลิตภัณฑ์จึงเกาะตัวอยู่ใกล้ชิดกัน ทำให้เนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมที่มีโปรตีนถั่วเหลืองสกัดต่ำมีความแน่นจึงมีความแข็งแรงสูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sheard และคณะ (1984) ที่รายงานว่าเอกซ์ทรูคตจาก

DSF มีความแข็งแรงและเสถียรมากกว่าเอกซ์ทรูเดทของ SPI แต่ขัดแย้งกับผลการวิจัยของ Kazemzadeh, Diehl, Rhee และ Dahm (1986) ที่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ SPI ในช่วง 40-70 เปอร์เซ็นต์ ทำให้แรงที่กระทำต่อเอกซ์ทรูเดทมีค่าเพิ่มขึ้น

จากการตรวจสอบลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียม โดยศึกษาลักษณะการฉีกได้และความเป็นเส้นใยของเนื้อเทียมด้วยผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนแล้ว พบว่าการเติม SPI ในระดับ 20 เปอร์เซ็นต์ ให้เนื้อเทียมที่มีลักษณะฉีกได้และความเป็นเส้นใยสูงที่สุด ( $p < 0.05$ ) ดังตารางที่ 26 เนื้อเทียมที่เติม SPI ในปริมาณมากขึ้น ทำให้ลักษณะการฉีกได้และความเป็นริ้วเส้นใยลดลงมาก ( $p < 0.05$ ) ซึ่งอาจเป็นผลจากเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของ SPI ในปริมาณมากขึ้น มีอัตราการขยายตัวสูง เกิดช่องรูพรุนขนาดใหญ่ในโครงสร้าง จึงขัดขวางการจัดเรียงตัวแบบเส้นใยของโมเลกุลโพรตีน ทำให้ไม่สามารถฉีกเนื้อเทียมออกจากกันตามแนวยาวได้ นอกจากนี้ยังเป็นผลจากทอร์คและความดันของโดในระหว่างเอกซ์ทรูชันมีค่าต่ำ โดย Lin และคณะ (2002) พบว่าการที่ทอร์คและความดันที่หัวแบบภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์มีค่าน้อย อาจไม่เพียงพอต่อการสร้างโครงสร้างแบบเส้นใยของเนื้อเทียม เนื่องจากค่าทอร์ค และความดันที่หัวแบบของโดเป็นตัวแปรทางกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่เกี่ยวข้องกับความหนืดของโดในระบบ การที่ความหนืดของโดสูงขึ้นต้องใช้แรงทอร์คในการหมุนสกรูให้ขับเคลื่อนสูงขึ้น และเมื่อโดที่มีความหนืดสูงเคลื่อนผ่านรูเปิดที่หัวแบบออกสู่ภายนอกเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ จะทำให้ความดันที่หัวแบบสูงตามไปด้วย ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าโดของเนื้อเทียมที่เติม SPI ในปริมาณที่สูงขึ้น มีความหนืดลดลง ทำให้ทอร์คและความดันที่หัวแบบต่ำ จึงส่งผลให้เนื้อเทียมมีโครงสร้างแบบเส้นใยลดลง

### 3.3 ผลของโพแทสเซียมโบรเมท

#### 3.3.1 พันธะเคมี

จากการศึกษาปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ที่แสดงถึงชนิดพันธะเคมีในเนื้อเทียมที่เติม PB บ่งชี้ว่าพันธะไดซัลไฟด์ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจนมีบทบาทสำคัญต่อการเชื่อมโยงโครงสร้างโปรตีนของเนื้อเทียม ซึ่งเห็นได้จากปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ของเนื้อเทียมที่เติม PB ในระดับ 0-180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ใน P+ME มีค่าไม่แตกต่างจากของ P+S+U ( $p > 0.05$ ) ดังตารางที่ 29 นอกจากนี้ยังพบว่าพันธะเคมีสำคัญที่เชื่อมโยงภายในโมเลกุลโปรตีนของวัตถุดิบ ได้แก่ พันธะไดซัลไฟด์ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเป็นพันธะเคมีชนิดเดียวกันกับที่พบในโครงสร้างโปรตีนของเนื้อเทียม ซึ่งสังเกตได้จากปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ของวัตถุดิบที่เติม PB 0-180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ใน P+ME มีค่าไม่แตกต่างจากของ P+S+U ( $p > 0.05$ ) ดังแสดงในตารางที่ 29

**ตารางที่ 29** ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ (กรัม/กรัม โปรตีน) ของวัตถุดิบและเนื้อเยื่อจากโปรตีน  
ตัวเหลืองที่เติมโพแทสเซียมโบรเมท 0, 60, 120 และ 180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม  
ในตัวทำละลาย 3 ชนิด

| Type / Buffer                | P <sup>(1)</sup>       | P+M <sup>(2)</sup> | P+S+U <sup>(3)</sup>     |
|------------------------------|------------------------|--------------------|--------------------------|
| 0 (mg/kg) (M) <sup>(4)</sup> | 0.527 B <sup>(6)</sup> | 0.886A             | 1.008a <sup>(7)</sup> ,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) <sup>(5)</sup> | 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                    |

<sup>(1)</sup> หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

<sup>(2)</sup> หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีเมอแคปโทธานอล

<sup>(3)</sup> หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มียูเรีย และ โซเดียม โดเดซิลซัลเฟต

<sup>(4)</sup> หมายถึง วัตถุดิบ

<sup>(5)</sup> หมายถึง ผลึกภัณฑ์เนื้อเทียม

<sup>(6)</sup> ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันตามแนวนอน หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทาง สถิติ ( $p < 0.05$ )

<sup>(7)</sup> ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันตามแนวดิ่ง หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

เมื่อศึกษาผลของ PB ในระดับ 60, 120 และ 180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ต่อการสร้างพันธะเคมีของโปรตีนในเนื้อเยื่อ แสดงดังตารางที่ 29 พบว่าเนื้อเยื่อที่มี PB มีการเชื่อมโยงโครงสร้างทางเคมีด้วยพันธะไดซัลไฟด์ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเป็นพันธะเคมีชนิดเดียวกันกับที่พบในเนื้อเยื่อที่ไม่ได้เติม PB โดยพิจารณาจากปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ใน P+ME ของเอกซ์ทราคตที่เติม PB 60, 120, 180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าไม่แตกต่างทางสถิติกับของเอกซ์ทราคตที่ไม่มีส่วนผสมของ PB ( $p > 0.05$ ) รวมทั้งปริมาณหมู่ซัลไฮดริลของผลิตภัณฑ์เนื้อเยื่อที่ไม่มีและมีส่วนผสมของ PB 60, 120 และ 180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ดังแสดงในตารางที่ 30 การวัดปริมาณโปรตีนที่ละลายได้นี้อาจนำมาใช้อ้างอิงถึงระดับการเชื่อมโยงทางพันธะเคมีในโครงสร้างของโปรตีนได้ แสดงว่าการเติม PB อาจไม่มีผลต่อระดับพันธะไดซัลไฟด์ระหว่างโมเลกุลโปรตีนของเนื้อเยื่อ จึงไม่มีผลต่อปริมาณหมู่ซัลไฮดริลในเนื้อเยื่อด้วย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่สภาวะการเอกซ์ทราคชันไม่เหมาะสมต่อการทำงานของ PB เนื่องจาก PB ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างหมู่ซัลไฮดริลของโปรตีน ให้เกิดเป็นพันธะไดซัลไฟด์อย่างช้าๆ ที่สภาวะ



อุณหภูมิห้อง ซึ่งพบได้ในการทำขนมปัง ส่วนกระบวนการเอกซ์ทรูชันเป็นกระบวนการให้ความร้อนและความดันสูงในระยะเวลาสั้น จึงทำให้ PB ไม่สามารถเหนียวนำไปเกิดพันธะไดซัลไฟด์ในโครงสร้างของโปรตีนถั่วเหลืองได้ จึงไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการเชื่อมโยงของพันธะไดซัลไฟด์ในโปรตีนถั่วเหลืองของเนื้อเทียม

ตารางที่ 30 ปริมาณหมู่ซัลไฮดริล (ไมโคร โมล/กรัม โปรตีน) ของวัตถุดิบและเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองที่ไม่เค็มและเค็มโพแทสเซียมโบรเมท 60, 120 และ 180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

| Potassium bromate level<br>(mg/kg) | sulfhydryl group content  |      |      |      |
|------------------------------------|---------------------------|------|------|------|
|                                    | ( $\mu$ mole / g protein) |      |      |      |
|                                    | 0                         | 60   | 120  | 180  |
| Feed                               | 7.88                      | 8.86 | 7.69 | 8.47 |
| Extrudate                          | 8.89                      | 9.05 | 9.39 | 8.71 |

นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณหมู่ซัลไฮดริลของโปรตีนถั่วเหลืองในเนื้อเทียม มีค่าไม่แตกต่างทางสถิติกับของวัตถุดิบที่มีปริมาณ PB เท่ากัน ( $p > 0.05$ ) (ตารางที่ 30) แสดงว่าการเอกซ์ทรูชันไม่ได้ทำให้ปริมาณหมู่ซัลไฮดริลของโปรตีนถั่วเหลืองเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งขัดแย้งกับผลการทดลองของ Burgess และ Stanley (1976) ที่รายงานว่าหลังจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันของโปรตีนถั่วเหลืองทำให้มีกลุ่มซัลไฮดริลอิสระเพิ่มขึ้น และจากผลการทดลองของ Rebello และ Schaich (1990) พบว่าการเอกซ์ทรูชันของแป้งสาลีที่ความชื้น 20 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 160 และ 185 องศาเซลเซียส ทำให้ปริมาณหมู่ซัลไฮดริลในโมเลกุลโปรตีนลดลง รวมทั้งจากผลการวิจัยของ Li และ Lee (2000) ที่รายงานว่าการทำเอกซ์ทรูชันของแป้งถั่วเลนทิว (lentil bean flour) มีปริมาณพันธะไดซัลไฟด์และหมู่ซัลไฮดริลของโปรตีนถั่วเลนทิวในเอกซ์ทรูเดตลดลง นอกจากนี้โปรตีนถั่วเหลืองมีกรดอะมิโนซิสเตอีนในปริมาณจำกัด โดยโปรตีนถั่วเหลืองมีซิสเตอีน 2.5 มิลลิกรัมต่อกรัมโปรตีน จึงอาจทำให้การเกิดพันธะไดซัลไฟด์เพิ่มขึ้นในปริมาณน้อยในโครงสร้างของโปรตีนของเอกซ์ทรูเดต จึงอาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการเชื่อมโยงของพันธะไดซัลไฟด์ในโปรตีนถั่วเหลืองไม่ชัดเจนเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของพันธะไดซัลไฟด์ในโครงสร้างของโปรตีนสาลีที่มีซิสเตอีนสูงถึง 23 มิลลิกรัมต่อกรัมโปรตีน (Liu, 1997) ดังจะเห็นได้อย่างชัดเจนในผลการทดลองของ Li และ Lee (1996b, 1998) ที่พบว่าเมื่อเติมซิสเตอีนที่เป็นสารรีคิวซึ่งในช่วง 0.25-1.5 เปอร์เซ็นต์ ในการเอกซ์ทรูชันของแป้งสาลี ทำให้ปริมาณพันธะไดซัลไฟด์เพิ่มขึ้นเกือบสองเท่าที่ระดับความเข้มข้นซิสเตอีน 1.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงปริมาณซัลไฮดริลในโปรตีนสาลีของเอกซ์ทรูเดต

จากผลการทดลองในตารางที่ 29 ยังพบว่าปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ใน P+S+U ของเอกซ์ทรูเดตที่เค็ม PB 60, 120, 180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าไม่แตกต่างทางสถิติกับของเอกซ์ทรูเดต

ที่ไม่มีส่วนผสมของ PB ( $p>0.05$ ) แสดงว่าการเติม PB อาจไม่มีผลต่อระดับอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจนเช่นกัน รวมทั้งการเติม PB ในวัตถุคิบัก็ไม่ได้ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของพันธะเคมีทุกชนิดภายในโมเลกุลโปรตีน โดยสังเกตได้จากปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ของวัตถุคิบัที่ไม่มีและมีส่วนผสมของ PB ที่ระดับ 60, 120, 180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ใน P+ME มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ ) ซึ่งพบผลเช่นเดียวกันนี้ใน P+S+U ( $p>0.05$ ) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1

จากการเปรียบเทียบปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ของเนื้อเยื่อเทียบกับวัตถุคิบัที่นำมาใช้ในการแปรรูปด้วยการเอกซ์ทรูชัน ดังตารางที่ 29 พบว่าปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ของเอกซ์ทรูคตทุกสูตรในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ทั้งสามชนิด มีค่าต่ำกว่าปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ของวัตถุคิบัอย่างมีนัยสำคัญ ( $p<0.05$ ) แสดงว่ากระบวนการเอกซ์ทรูชันทำให้ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ของเนื้อเยื่อจากโปรตีนถั่วเหลืองมีค่าลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากการที่โปรตีนถั่วเหลืองที่ผ่านการเอกซ์ทรูชันมีการจัดเรียงโครงสร้างในรูปแบบใหม่ที่มีความซับซ้อนมากขึ้นด้วยพันธะไคซัลไฟด์ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเป็นพันธะเคมีชนิดเดียวกับที่พบภายในโมเลกุลโปรตีนของวัตถุคิบั จึงทำให้ความสามารถในการสกัดโปรตีนของสารตัวทำละลายลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1

### 3.3.2 ลักษณะทางกายภาพ

จากการศึกษาผลของ PB ต่อการสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเยื่อ ดังตารางที่ 31 พบว่า PB ที่ระดับ 60-180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่มีส่วนช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้เนื้อเยื่อ โดยเนื้อเยื่อที่เติม PB ในระดับ 60, 120 และ 180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีความเครียดไม่แตกต่างทางสถิติกับเนื้อเยื่อที่ไม่มีส่วนผสมของ PB ( $p>0.05$ ) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่ PB ไม่มีผลต่อการเพิ่มพันธะไคซัลไฟด์ในโครงสร้างโปรตีนของเนื้อเยื่อจากโปรตีนถั่วเหลือง ดังเห็นได้จากผลการทดลองด้านพันธะเคมีในหัวข้อที่ผ่านมาข้างต้น และอาจเป็นผลมาจากการที่อัตราการขยายตัวของเนื้อเยื่อที่มี PB ในระดับ 0-180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ ) (ตารางที่ 31) นอกจากนี้ยังพบว่า PB ไม่ได้มีส่วนช่วยปรับปรุงการจัดเรียงตัวแบบเส้นใยของเนื้อเยื่อ โดยพบว่าเนื้อเยื่อที่เติม PB 0, 60, 120 และ 180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางด้านารฉีกได้ และความเป็นเส้นใยไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ ) รวมทั้งการเติม PB ที่ระดับ 60-180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่มีผลต่อสมบัติทางด้านการไหลของโคเนื้อเยื่อ ซึ่งสังเกตได้จากการที่ทอร์คและความดันที่หัวแบบของผลิตภัณฑ์เนื้อเยื่อที่เติม PB ที่ระดับ 0-180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ ) แสดงให้เห็นว่า PB ไม่มีผลต่อการสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเยื่อ เนื่องจากเนื้อเยื่อที่มีและไม่มี PB เป็นส่วนผสม มีความแข็งแรงของเนื้อสัมผัสและลักษณะการจัดเรียงตัวแบบเส้นใยของโครงสร้างภายในที่ไม่แตกต่างกัน

**ตารางที่ 31** ตัวแปรตามของกระบวนการแปรรูป และลักษณะทางกายภาพของเนื้อเทียมจากโปรตีน ถั่วเหลืองที่เติม โปแทสเซียม โบรเมท 0, 60, 120 และ 180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

| Parameters and Characteristics | Soy protein isolate (%) |        |        |        |
|--------------------------------|-------------------------|--------|--------|--------|
|                                | 0                       | 60     | 120    | 180    |
| Torque (%)                     | 35.83ab <sup>(1)</sup>  | 39.17a | 38.83a | 40.83a |
| Die pressure (psi)             | 228.33                  | 250.00 | 243.33 | 256.67 |
| Expansion ratio                | 2.13                    | 2.02   | 2.06   | 1.98   |
| Stress (g/cm <sup>2</sup> )    | 2,598                   | 3,237  | 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   |

<sup>(1)</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวอนหมายถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

ผลการทดลองข้างต้นนี้ไม่สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Rhee และคณะ (1981) ที่พบว่าการเติมสารออกซิไดซิ่งในวัตถุดิบเพื่อแปรรูปเนื้อเทียม ทำให้เนื้อเทียมไม่พองตัวและมีเนื้อสัมผัสที่ไม่ดี โดย Rhee และคณะ ได้เติมสารออกซิไดซิ่ง ได้แก่ โปแทสเซียมไฮโอเดต 0.01 และ 0.05 เปอร์เซ็นต์ ในแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน แล้วนำไปแปรรูปด้วยเครื่องสร้างเนื้อสัมผัสด้วยการกดอัด (hand press texturizer) ที่ความชื้น 25 เปอร์เซ็นต์ ได้เนื้อเทียมมีรูปร่างแบบแท่งที่ไม่พองตัว ผิวหน้าหยาบและไม่ต่อเนื่อง มีความเครียดและโครงสร้างแบบเส้นใยน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม ซึ่งอาจเป็นผลจากความแตกต่างทางด้านหลักการแปรรูป กล่าวคือการสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมด้วยเครื่องสร้างเนื้อสัมผัสแบบการกดอัดไม่มีขั้นตอนของการเจือจาง จึงทำให้โมเลกุลของโปรตีนไม่ได้คลายตัวออกเป็นโครงสร้างสายยาวอย่างสมบูรณ์ และเมื่อเติมโปแทสเซียมไฮโอเดตลงในวัตถุดิบ จึงทำให้เกิดการเกาะตัวกันของโมเลกุลโปรตีนอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งทำให้ไม่เกิดการจัดเรียงตัวแบบเส้นใยของโครงสร้างภายในเนื้อเทียม และอาจทำให้เนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมไม่แข็งแรง แต่เมื่อเติมโซเดียมซัลไฟด์และซิสเตอีน ซึ่งเป็นสารรีดิวซ์ที่ระดับ 0.1-0.5 เปอร์เซ็นต์ ในแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมันแล้วแปรรูปด้วยการกดอัดเช่นเดิมพบว่าผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมมีการขยายตัวเพิ่มขึ้น มีความหนาแน่นจำเพาะลดลง และมีความสามารถในการกักเก็บน้ำมากกว่าตัวอย่างควบคุม เนื่องจากพันธะไดซัลไฟด์ในโครงสร้างของโปรตีนตามธรรมชาติถูกทำลายด้วยสารรีดิวซ์ ส่งผลให้โมเลกุลโปรตีนเกิดการคลายตัวออกเป็นโครงสร้างแบบสายยาว จึงสามารถเรียงตัวเป็นโครงสร้างร่างแหที่ต่อเนื่องซึ่งจัดเป็นโครงสร้างหลักของเนื้อเทียม ส่งผลให้เนื้อเทียมสามารถขยายตัวออกได้เมื่อมีการปล่อยความดันไอน้ำออกจากระบบ ซึ่งจากผลการทดลองของ Rhee และคณะ ที่แปรรูปเนื้อเทียมด้วยการกดอัดนั้น มีกลไกการสร้างเนื้อสัมผัสที่แตกต่างไปจากการเอกซ์ทรูชัน เนื่องจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีขั้นตอนการกวนผสมที่ให้แรงเฉือนกับวัตถุดิบอยู่

แล้ว จึงทำให้โมเลกุลโปรตีนเกิดการแตกแยกและคลายตัวออกจากกันได้เป็นโมเลกุลสายยาวที่สามารถมาจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างร่างแหอย่างต่อเนื่องได้ และสร้างพันธะเคมีระหว่างโปรตีนชิ้นใหม่ในเนื้อเยื่อ ส่วน PB มีกลไกการทำงานที่ไม่สอดคล้องกับกระบวนการเอกซ์ทรูชัน จึงไม่มีผลต่อการสร้างพันธะไคซัลไฟด์ในเนื้อเยื่อ นอกจากนี้จากผลการทดลองของ Rhee และคณะ และของ Cegla และคณะ (1978) แสดงให้เห็นว่าการเติมสารรีดิวซ์ซึ่งเพื่อไปลดระดับการเชื่อมโยงด้วยพันธะไคซัลไฟด์ในโครงสร้างของโปรตีน ทำให้เอกซ์ทรูเคมีเนื้อสัมผัสที่ดีกว่าเอกซ์ทรูเคมีที่ไม่ได้เติมสารรีดิวซ์ ซึ่งแสดงว่าการเอกซ์ทรูชันอาจทำให้โปรตีนคลายตัวออกเป็นโครงสร้างโมเลกุลแบบสายยาวได้ไม่สมบูรณ์นัก เมื่อเติมสารรีดิวซ์จึงสามารถไปช่วยทำลายพันธะไคซัลไฟด์ในระหว่างเอกซ์ทรูชันได้ ซึ่งขัดแย้งกับผลการทดลองของ Li และ Lee (1996b) ที่พบว่าการเอกซ์ทรูชันแป็งสาที่เติมซิสเตอีนซึ่งเป็นสารรีดิวซ์ ทำให้เอกซ์ทรูเคมีโครงสร้างภายในและเนื้อสัมผัสที่ไม่ดี

### 3.4 ผลของแป็งสาต่อลักษณะทางกายภาพ และสมบัติเชิงหน้าที่

จากการศึกษาผลของแป็งสาต่อเนื้อสัมผัสของเนื้อเยื่อโปรตีนถั่วเหลือง ซึ่งแสดงข้อมูลในตารางที่ 32 พบว่าแป็งสาที่มีผลต่อเนื้อสัมผัสของเนื้อเยื่อ โดยเนื้อเยื่อที่มีแป็งสาเป็นส่วนผสม 20 เปอร์เซ็นต์ มีความเครียดไม่แตกต่างทางสถิติกับเนื้อเยื่อโปรตีนถั่วเหลืองที่เป็นตัวอย่างควบคุม ( $p > 0.05$ ) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแป็งสาในเนื้อเยื่อขึ้นเป็น 40 เปอร์เซ็นต์ พบว่าความเครียดของเนื้อเยื่อมีค่าลดลง ( $p < 0.05$ ) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากเนื้อเยื่อที่มีแป็งสาเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 40 เปอร์เซ็นต์ มีอัตราการขยายตัวสูงขึ้น ( $p < 0.05$ ) (ตารางที่ 32) ส่งผลให้เนื้อสัมผัสของเนื้อเยื่ออ่อนตัวและไม่แข็งแรง เนื่องจากโมเลกุลสตาร์ชมีสมบัติให้ความยืดหยุ่นแก่โครงสร้างของผลิตภัณฑ์อาหาร (นิธิยา รัตนา ปนนท์, 2543; Harper, 1981) จึงทำให้เนื้อเยื่อที่ส่วนผสมของแป็งสาที่มีอัตราการขยายตัวมากขึ้น โครงสร้างภายในที่เกิดการจัดเรียงตัวกันอย่างหลวมๆ ไม่แน่นอน

นอกจากนี้เนื้อเยื่อที่มีปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองลดลง มีโครงสร้างหลักที่เกิดจากการจัดเรียงตัวเป็นเฟสต่อเนื่องของโปรตีนถั่วเหลืองมีความแข็งแรงลดลง รวมทั้งการที่อนุภาคสตาร์ชสาที่กระจายตัวในโครงสร้างของโคเนื้อเยื่อนั้น อาจไปรบกวนการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างร่างแหที่ต่อเนื่องของโปรตีนถั่วเหลืองในโคได้ (Guy, 1994) ดังคำดัชนีความสมบูรณ์ของโครงสร้างของเนื้อเยื่อที่มีแป็งสา 40 เปอร์เซ็นต์ มีค่าต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อเยื่อที่ไม่มีแป็งสาเป็นส่วนผสม ( $p < 0.05$ ) ดังแสดงในตารางที่ 32

ตารางที่ 32 ตัวแปรตามของกระบวนการแปรรูป ลักษณะทางกายภาพ และสมบัติเชิงหน้าที่ของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองที่เติมแป้งสาลี 0, 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์

| Parameters and Characteristics | Wheat flour (%)      |        |        |
|--------------------------------|----------------------|--------|--------|
|                                | 0                    | 20     | 40     |
| Torque (%)                     | 40.45                | 32.75  | 36.55  |
| Die pressure (psi)             | 302.73               | 269.09 | 275.45 |
| Expansion ratio                | 1.81b <sup>(1)</sup> | 2.09ab | 2.45a  |
| Integrity index                | 0.90a                | 0.72ab | 0.46b  |
| Stress (g/cm <sup>2</sup> )    | 2,577ab              | 3,081a | 2,184b |
| Textural appearance score      |                      |        |        |
| -Tearing                       | 2.69b                | 7.25a  | 9.34a  |
| -Fibrousness                   | 4.61c                | 6.80b  | 8.93a  |

<sup>(1)</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวอนหมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

จากการตรวจสอบลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียม พบว่าการเติมแป้งสาลีในเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง ทำให้เนื้อเทียมมีลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้นอย่างชัดเจน โดยเนื้อเทียมที่มีระดับแป้งสาลีเพิ่มขึ้นมีลักษณะทางด้านกรลิกได้และความเป็นเส้นใยเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง ( $p < 0.05$ ) (ตารางที่ 32) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากโปรตีนและสตาร์ชสาลีสามารถจัดเรียงตัวไปตามโครงสร้างสายยาวของโปรตีนถั่วเหลืองได้ ทำให้เกิดโครงสร้างภายในที่มีลักษณะของเส้นใยที่สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนขึ้น ประกอบกับการที่เนื้อเทียมที่มีแป้งสาลีเป็นส่วนผสมนั้นมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นด้วย จึงสามารถลิกเนื้อเทียมออกจากกันได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่าเนื้อเทียมที่เติมแป้งสาลี 40 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณโปรตีนทั้งหมดต่ำกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 2) ซึ่งเป็นปริมาณโปรตีนต่ำที่สุดในการสร้างเนื้อสัมผัสของโปรตีนถั่วเหลืองด้วยการเอกซ์ทรูชันที่ Kearns และคณะ (1989) ได้นำเสนอไว้ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากแป้งสาลีที่มีส่วนช่วยปรับปรุงโครงสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียม จึงทำให้แปรรูปเนื้อเทียมด้วยการเอกซ์ทรูชันได้ จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าแป้งสาลีทำให้การสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน โดยทำให้เนื้อเทียมมีอัตราการขยายตัวสูงขึ้น รวมทั้งมีลักษณะปรากฏทางด้านกรลิกได้และความเป็นเส้นใยเพิ่มขึ้นมาก โดยที่ไม่ได้ส่งผลต่อสมบัติทางด้านกรไลของโคโนในระบบระหว่างการเอกซ์ทรูชันมากนัก เนื่องจากเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้งสาลีมีค่าทอร์คและความดันที่หัวแบบ ไม่แตกต่างทางสถิติกับของเนื้อเทียมไม่ได้เติมแป้งสาลี ( $p > 0.05$ ) (ตารางที่ 32)

### 3.5 ผลของโปรตีนกลูเตนสาลี สตาร์ชสาลี และแป้งสาลีต่อลักษณะทางกายภาพ

จากการทดลองผลของแป้งสาลีต่อเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมในหัวข้อ 3.4 ข้างต้น ได้นำมาสู่การศึกษาบทบาทขององค์ประกอบของแป้งสาลี ได้แก่ โปรตีนกลูเตนสาลี และสตาร์ชสาลี ที่มีต่อลักษณะทางกายภาพของเนื้อเทียม โดยเติมโปรตีนกลูเตนสาลีและสตาร์ชสาลี ในวัตถุดิบที่มีส่วนผสมหลักเป็นแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมันและโปรตีนถั่วเหลืองสกัด และควบคุมให้เนื้อเทียมมีปริมาณโปรตีนทั้งหมดใกล้เคียงกันในช่วง 58-59 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 33

ตารางที่ 33 ตัวแปรตามของกระบวนการแปรรูป และลักษณะทางกายภาพของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองที่เติม โปรตีนกลูเตน สตาร์ชสาลี แป้งสาลี และส่วนผสมของกลูเตนและสตาร์ชสาลี

| Parameters and Characteristics | DSF+SPI <sup>(1)</sup> | DSF+SPI <sup>(2)</sup><br>+WG | DSF+SPI <sup>(3)</sup><br>+WS | DSF+SPI <sup>(4)</sup><br>+WF | DSF+SPI <sup>(5)</sup><br>+WS+WG |
|--------------------------------|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Torque (%)                     | 53.57c <sup>(6)</sup>  | 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                        | 2.75a                         | 2.48b                            |
| Stress (g/cm <sup>2</sup> )    | 2,443a                 | 2,853a                        | 2,335ab                       | 1,798b                        | 2,392ab                          |
| Textural appearance score      |                        |                               |                               |                               |                                  |
| - Tearing                      | 3.27bc                 | 2.24c                         | 5.36ab                        | 5.26ab                        | 6.70a                            |
| - Fibrousness                  | 3.74b                  | 3.39b                         | 4.94ab                        | 5.08ab                        | 6.49a                            |

<sup>(1)</sup> เนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน 80 % และโปรตีนถั่วเหลืองสกัด 20 %

<sup>(2)</sup> เนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน 80 % โปรตีนถั่วเหลืองสกัด 10 % และกลูเตนสาลี 10 %

<sup>(3)</sup> เนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน 44 % โปรตีนถั่วเหลืองสกัด 40 % และสตาร์ชสาลี 16 %

<sup>(4)</sup> เนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน 40 % โปรตีนถั่วเหลืองสกัด 40 % และแป้งสาลี 20 %

<sup>(5)</sup> เนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน 40 % โปรตีนถั่วเหลืองสกัด 40 % กลูเตน 2.8 % และสตาร์ชสาลี 17.2 %

<sup>(6)</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวอนหมายถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากผลการทดลองในตารางที่ 33 พบว่าเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของกลูเตนสาลี มีความเหนียวและลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางด้านการฉีกได้ และความเป็นเส้นใยไม่แตกต่างทางสถิติกับเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองซึ่งเป็นตัวอย่างควบคุม ( $p > 0.05$ ) ซึ่งอาจเป็นผลจากการที่กลูเตนสาลีสามารถเข้าร่วมในโครงสร้างของโปรตีนถั่วเหลืองได้ จึงทำให้มีลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างแบบเส้นใยไม่แตกต่างจากโครงสร้างของเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของโปรตีนถั่วเหลืองเพียงอย่างเดียว แต่ทั้งนี้เนื้อ

เทียมที่เติมกลูเตนสาลีมีอัตราการขยายตัวต่ำกว่าเนื้อเทียมชนิดอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ทำให้เนื้อเทียมที่มีกลูเตนสาลีเป็นส่วนผสมมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวใกล้ชิดกันมาก จึงไม่สามารถฉีกเนื้อเทียมออกจากกันตามแนวยาวได้ และไม่สามารถสังเกตลักษณะการเรียงตัวแบบเส้นใยของเนื้อเทียมได้ เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของสตาร์ซสาลีที่มีอัตราการขยายตัวสูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Neumann, Jasberg และ Wall (1984) ที่พบว่าเอกซ์ทรูเดทที่มีส่วนผสมของกลูเตนข้าวโพดและแป้งถั่วเหลืองพร้อมไขมันในอัตราส่วน 50 ต่อ 50 เปอร์เซ็นต์ มีเนื้อสัมผัสที่เกาะตัวกันแน่น ไม่ค่อยพองตัว และมีโครงสร้างแบบเส้นใยคล้ายคลึงกับเอกซ์ทรูเดทของแป้งถั่วเหลืองพร้อมไขมัน ในขณะที่เอกซ์-ทรูเดทที่มีส่วนผสมของกลูเตนข้าวโพดเพียงอย่างเดียวนั้น ไม่มีการจัดเรียงตัวแบบเส้นใยของโครงสร้างภายใน ซึ่งจากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่ากลูเตนสาลีไม่มีส่วนช่วยปรับปรุงการจัดเรียงตัวแบบเส้นใยของเนื้อเทียมให้ดีขึ้น แต่อาจมีส่วนช่วยทำให้เนื้อเทียมมีความแข็งแรงมากขึ้น

เมื่อศึกษาบทบาทของสตาร์ซสาลีที่มีต่อการสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียม พบว่า สตาร์ซสาลีมีส่วนช่วยพัฒนาการจัดเรียงตัวแบบเส้นใยของเนื้อเทียม โดยทำให้เนื้อเทียมที่มีสตาร์ซสาลีเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ เนื้อเทียมที่เติมสตาร์ซสาลี เนื้อเทียมที่เติมแป้งสาลี และเนื้อเทียมที่เติมส่วนผสมระหว่างสตาร์ซสาลีและกลูเตนสาลีมีลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางการฉีกได้และความเป็นเส้นใยมากกว่าเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ดังแสดงในตารางที่ 33 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากสตาร์ซสาลีมีโครงสร้างที่ใหญ่ และไม่สามารถเข้าร่วมกับโปรตีนถั่วเหลืองได้ จึงกระจายตัวพร้อมทั้งแยกเฟสโปรตีนถั่วเหลืองออกจากกัน จึงทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของโครงสร้างภายในที่มีลักษณะแบบเส้นใยของเนื้อเทียมเด่นชัดขึ้น นอกจากนี้จากการที่สตาร์ซสาลีสามารถขยายตัวได้ดีกว่าโปรตีน (Mohamed, 1990) จึงสามารถเพิ่มความยืดหยุ่นแก่ผลิตภัณฑ์อาหารได้ดีกว่าโปรตีนซึ่งเห็นได้จากกรณีที่เอกซ์ทรูเดทที่มีองค์ประกอบของสตาร์ซสาลีมีอัตราการขยายตัวสูงกว่าเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง และเนื้อเทียมที่เติมกลูเตนสาลีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Conway และ Anderson (1973) ที่พบว่าเอกซ์ทรูเดทของแป้งข้าวโพดที่ไม่มีส่วนผสมของ SPI มีอัตราการขยายตัวสูงกว่าเอกซ์ทรูเดทที่มีส่วนผสมของ SPI แต่ทั้งนี้ยังพบว่าเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมที่มีองค์ประกอบของสตาร์ซสาลี มีความเครียดไม่แตกต่างทางสถิติกับเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง ( $p < 0.05$ ) จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการเติมแป้งสาลีในวัตถุดิบสำหรับแปรรูปเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง ทำให้เนื้อเทียมมีลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางการฉีกได้และความเป็นเส้นใยเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากกลูเตนสาลีที่มีส่วนช่วยปรับปรุงให้เนื้อเทียมมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างภายในแบบเส้นใยมากขึ้น

### 3.6 ผลของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม

#### 3.6.1 พันธะเคมี

การวัดปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 5 ชนิดของทั้งเนื้อเทียม และวัตถุดิบที่มี FSF เป็นส่วนผสมในระดับ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังในตารางที่ 34 และ 35 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 34 ซึ่งสอดคล้องกับผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์โปรตีนที่ละลายได้เพิ่มขึ้นระหว่าง P+S+U+M กับ P+ME และระหว่าง P+S+U+M กับ P+S+U

ตารางที่ 34 ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ (กรัม/กรัม โปรตีน) ของเนื้อเทียมที่มีแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเป็นส่วนผสมในระดับ 0-50 เปอร์เซ็นต์ ในตัวทำละลาย 5 ชนิด

| Type/Buffer | P <sup>(1)</sup>      | P+S <sup>(2)</sup> | P+U <sup>(3)</sup> | P+M <sup>(4)</sup>          | P+S+U <sup>(5)</sup> |
|-------------|-----------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|----------------------|
| 0% FSF      | 0.090Y <sup>(1)</sup> | 0.282WX            | 0.347W             | 0.165wx <sup>(2)</sup> , 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              |

<sup>(1)</sup> หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

<sup>(2)</sup> หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต

<sup>(3)</sup> หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มียูเรีย

<sup>(4)</sup> หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีเมอแคปโทเอธานอล

<sup>(5)</sup> หมายถึง สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มียูเรีย และ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต

<sup>(6)</sup> ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันตามแนวนอน หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

<sup>(7)</sup> ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )



ตารางที่ 35 ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ (กรัม/กรัม โปรตีน) ของวัตถุดิบที่มีแป้งถั่วเหลือง  
ไขมันเต็มเป็นส่วนผสมในระดับ 0-50 เปอร์เซ็นต์ ในตัวทำละลาย 5 ชนิด

| Type/Buffer | P  | P+S        | P+U       | P+M       | P+S+U      |
|-------------|--|------------|-----------|-----------|------------|
| 0% FSF      | 0.520a <sup>(1)</sup> , C <sup>(2)</sup> | 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  |

<sup>(1)</sup> ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

<sup>(2)</sup> ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันตามแนวนอน หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

จากการศึกษาผลของปริมาณ FSF ต่อการสร้างพันธะเคมีของเนื้อเทียม ดังตารางที่ 34 พบว่าเมื่อปริมาณ FSF เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของพันธะไดซัลไฟด์ พันธะไฮโดรเจน และอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิกในโครงสร้างโปรตีนของเอกซ์ทรูเกต โดยเห็นได้จากเนื้อเทียมที่มีปริมาณ FSF เป็นส่วนผสมที่ระดับ 0 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ใน P+ME มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ซึ่งพบผลเช่นเดียวกันนี้ในปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ใน P+S+U, P+SDS และ P+Urea ส่วนการเติม FSF ในวัตถุดิบเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ใน P+S+U มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) แต่เมื่อเพิ่ม FSF ถึงระดับ 50 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) แสดงว่าไขมันที่มีปริมาณสูงมากในวัตถุดิบ อาจไปเกิดอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิกกับโปรตีนได้มากขึ้น จึงทำให้การเกิดอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิกระหว่างโมเลกุลโปรตีนลดลง ส่งผลให้ปริมาณโปรตีนของวัตถุดิบที่เติม FSF สูงขึ้นมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาบทบาทของ SDS+Urea และ ME ของเนื้อเทียมทุกชนิด ดังตารางที่ 36 พบว่าปริมาณโปรตีนที่ละลายได้เมื่อเติม SDS+Urea ใน P+ME ของเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มที่ระดับ 0, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงกว่าของ ME ที่เติมใน P+S+U อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) แสดงว่าพันธะไฮโดรเจน และอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก มีบทบาทสนับสนุนการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลโปรตีนในโครงสร้างของเนื้อเทียมมากกว่าพันธะไดซัลไฟด์ อาจเป็นผลจากการที่โปรตีนถั่วเหลืองที่สูญเสียสภาพทางธรรมชาติ โครงสร้างโปรตีนเกิดการคลายตัว และเปิดส่วนที่เป็นไฮโดรโฟบิกภายในโมเลกุลออกมา (Hermansson, 1978) ซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลโปรตีนตรงส่วนที่เป็นไฮโดรโฟบิกกับโมเลกุลโปรตีนอื่นๆ และกับโมเลกุลไขมันได้

จึงอาจทำให้สัดส่วนของการเชื่อมโยงโครงสร้างระหว่างโมเลกุลโปรตีนด้วยพันธะไดซัลไฟด์ลดลง โดยพันธะเคมีที่พบในเนื้อเยื่อนี้แตกต่างไปจากที่พบในวัตถุดิบ ซึ่งพบว่าพันธะไดซัลไฟด์ และอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก เป็นพันธะเคมีที่พบมากในวัตถุดิบ และมีบทบาทมากกว่าพันธะไฮโดรเจน โดยพิจารณาจากปริมาณ โปรตีนที่ละลายได้ของวัตถุดิบที่มี FSF 0-40 เปอร์เซ็นต์ ใน P+S และ P+ME มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ ) และมีค่ามากกว่าของ P+Urea ในวัตถุดิบที่มี FSF เป็นส่วนผสมใน ระดับ 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p<0.05$ ) ดังตารางที่ 35 ซึ่งเป็นผลมาจากการที่โมเลกุลโปรตีนถั่วเหลืองของวัตถุดิบ มีการเชื่อมโยงกันด้วยพันธะไดซัลไฟด์ เป็นหลักนั่นเอง

ตารางที่ 36 เปอร์เซ็นต์โปรตีนที่ละลายได้เพิ่มขึ้นของเนื้อเยื่อที่มีแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเป็นส่วนผสมในระดับ 0- 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเติมเมอแคปโทเอทานอลในบัพเฟอร์ที่มี โซเดียมโคเคซิลซัลเฟตและยูเรีย และเติมโซเดียมโคเคซิลซัลเฟตและยูเรีย ในบัพเฟอร์ที่มีเมอแคปโทเอทานอล ตามลำดับ

| Added reagent /<br>Full fat soy flour (%) | Soluble protein content (%) |      |      |      |      |      |
|---|-----------------------------|------|------|------|------|------|
|   | 0                           | 10   | 20   | 30   | 40   | 50   |
| 2-ME <sup>(1)</sup>                       | 167b <sup>(3)</sup>         | 224b | 211b | 176b | 241b | 222b |
| SDS+ Urea <sup>(2)</sup>                  | 513a                        | 482a | 574a | 413a | 607a | 597a |

<sup>(1)</sup> หมายถึง เมอแคปโทเอทานอล

<sup>(2)</sup> หมายถึง โซเดียมโคเคซิลซัลเฟต และยูเรีย

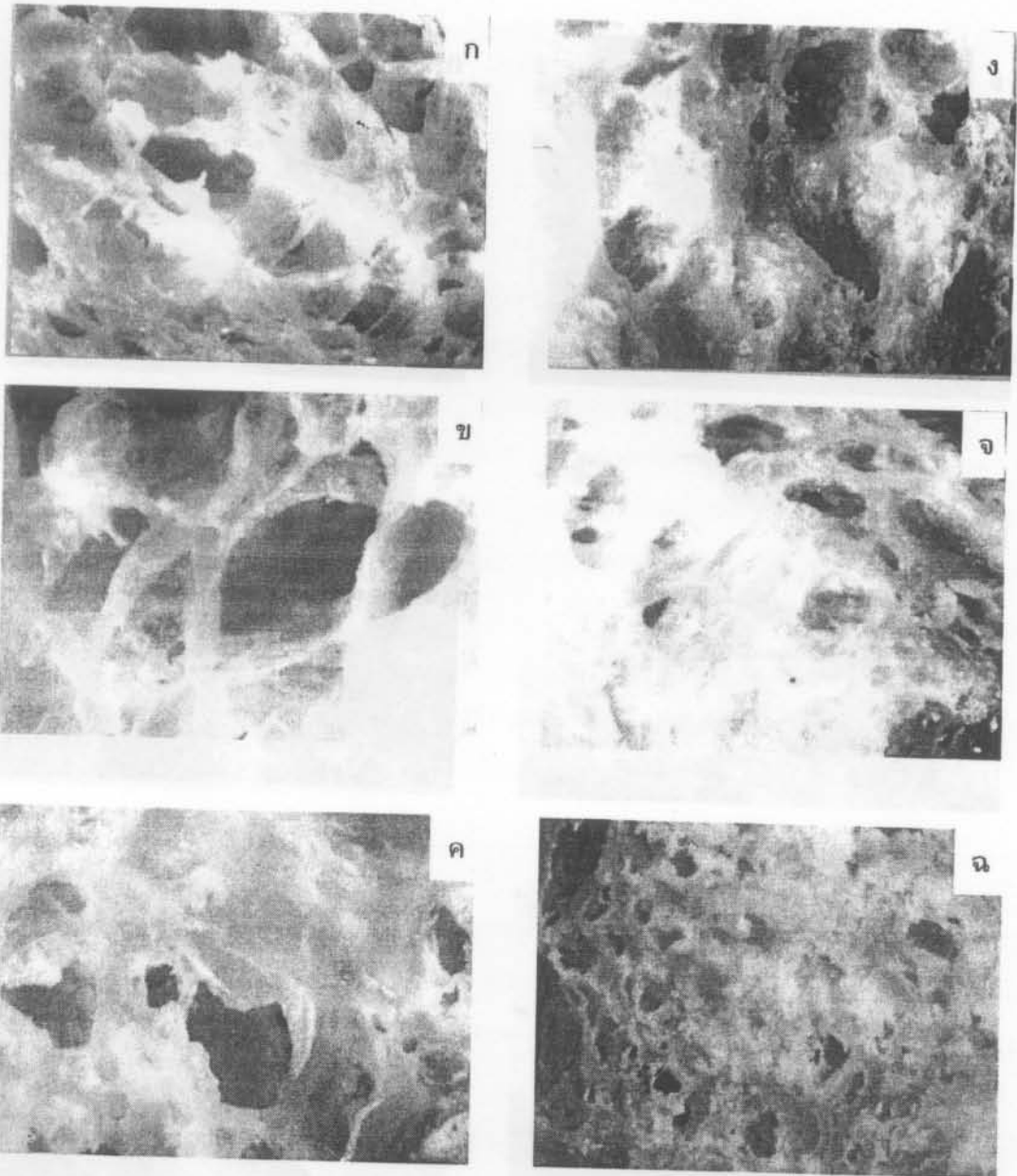
<sup>(3)</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p<0.05$ )

นอกจากนี้ยังพบว่ากระบวนการเอกซ์ทรูชัน มีผลทำให้การจัดเรียงตัวของโปรตีนในเนื้อเยื่อในรูปแบบใหม่ที่มีความซับซ้อนมากขึ้นกว่ารูปแบบเดิมที่พบในวัตถุดิบ (Smith, 1982) ดังสังเกตได้จากความสามารถในการละลายของโปรตีนในเอกซ์ทรูเตดลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ของวัตถุดิบ (Jeunink and Cheftel, 1979; Noguchi, Kugimiya, Haque, and Saio, 1981) ดังตารางที่ 34 และ 35 โดยพบว่าปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ของเนื้อเยื่อที่มีส่วนผสมของ FSF ระดับ 0-50 เปอร์เซ็นต์ ในสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ทุกชนิด มีค่าต่ำกว่าของวัตถุดิบที่มี FSF ส่วนผสมที่ระดับเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p<0.05$ ) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในหัวข้อที่ 3.2 และ 3.3 ข้างต้น

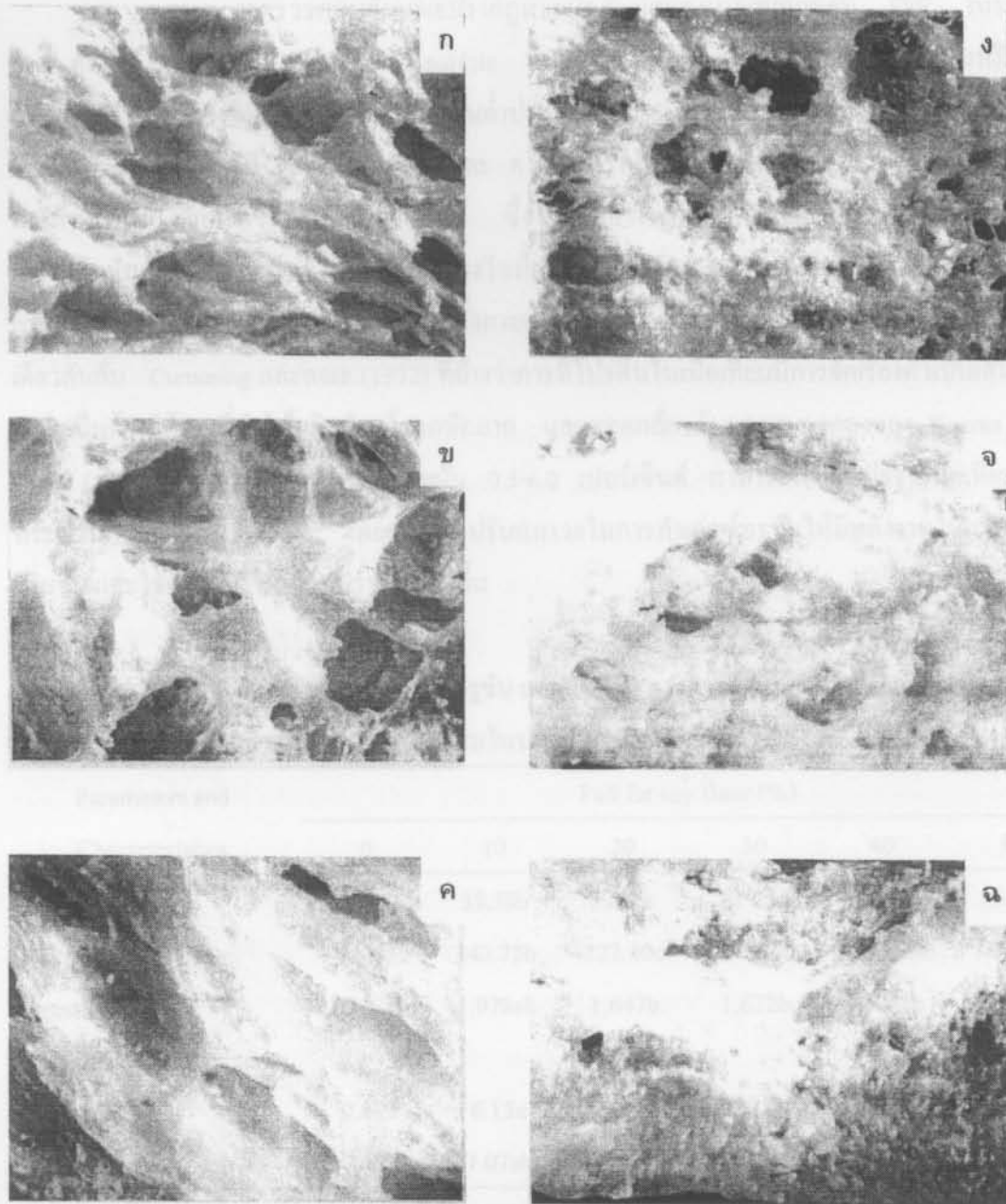
### 3.6.2 ลักษณะโครงสร้างภายในและเนื้อสัมผัส

จากการตรวจสอบโครงสร้างภายในของเนื้อเทียมที่เติม FSF ในระดับ 0-50 เปอร์เซ็นต์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ จากรูปที่ 17 ก-ค ซึ่งเป็นภาพถ่ายตามขวางที่กำลังขยาย 12 เท่า ของเนื้อเทียมที่มี FSF เป็นส่วนผสมในระดับต่ำ 0-20 เปอร์เซ็นต์ พบว่าเนื้อเทียมมีช่องรูพรุนทั้งขนาดเล็กและใหญ่ ผังของรูพรุนบาง มีริ้วเส้นใย

นอกจากนี้ยังพบว่าเนื้อเทียมมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างแบบเส้นใยยาวที่ดูโปร่งบาง ไม่เกาะเชื่อมตัวกันมากนัก ดังเห็นได้จากรูปที่ 18 ก-ค ซึ่งเป็นภาพถ่ายตามยาวที่กำลังขยาย 30 เท่า ของเนื้อเทียมที่มี FSF เป็นส่วนผสมในระดับต่ำ 0-20 เปอร์เซ็นต์ โดยโครงสร้างแบบเส้นใยดังกล่าวจัดเป็นโครงสร้างหลักของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม ที่เกิดจากการจัดเรียงตัวแบบโครงสร้างร่างแหของโปรตีนถั่วเหลืองร่วมกับการเรียงตัวของสตาร์ซสาลี และโปรตีนสาลีที่มีโมเลกุลแบบโพลีเมอร์สายยาว เมื่อปริมาณ FSF เพิ่มขึ้นถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เนื้อเทียมมีช่องรูพรุนที่มีขนาดเล็ก ผังของช่องรูพรุนหนาขึ้นมากและเกิดลักษณะที่เชื่อมเกาะตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ดังรูปที่ 17 ง-จ โดยไม่พบลักษณะการจัดเรียงตัวแบบเส้นใย แต่มีช่องรูพรุนขนาดเล็กในปริมาณน้อย เกิดลักษณะเนื้อสัมผัสที่เกาะตัวกันแบบแน่นทึบ ดังรูปที่ 18 ง-จ ไม่โปร่งบางเหมือนเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของ FSF ในระดับต่ำกว่า ซึ่งอาจเป็นผลจากไขมันใน FSF ไปลดการจัดเรียงตัวแบบเส้นใยของเนื้อเทียม โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gwiazda และคณะ (1987) ซึ่งพบว่าโครงสร้างภายในของเอกซ์ทรูเดต DSF ที่เติมน้ำมันจากถั่วเหลือง 15 เปอร์เซ็นต์ ที่ส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ปรากฏว่ามีหยดไขมันเล็กๆที่กระจายตัวไปตามโครงสร้างของโปรตีนและคาร์โบไฮเดรต จึงไปขัดขวางการจัดเรียงตัวแบบเส้นใยที่ดีของเอกซ์ทรูเดต และเมื่อทำเอกซ์ทรูชันของ FSF เต็มเพียงอย่างเดียว พบว่าเอกซ์ทรูเดตที่ได้ไม่มีโครงสร้างแบบเส้นใย เนื่องจากไขมันของ FSF ถูกบีบอัดกลายเป็นหยดไขมันที่แยกตัวออกจากวัตถุดิบมาเคลือบผนังบาร์เรลไว้ ทำให้ความดันภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ต่ำ จึงผลักดันโคเนื้อเทียมให้ผ่านหัวแบบออกมาอย่างรวดเร็ว ทำให้การสร้างเนื้อสัมผัสไม่สมบูรณ์ ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการที่ไขมันไปรบกวนการรับน้ำเข้าสู่โครงสร้างของวัตถุดิบ ทำให้โคเนื้อเทียมมีความหนืดต่ำ ซึ่งสังเกตได้จากการที่ทอร์คและความดันที่หัวแบบของเนื้อเทียมมีส่วนผสมของ FSF ในปริมาณมากถึง 50 เปอร์เซ็นต์ มีค่าต่ำมาก ดังแสดงไว้ในตารางที่ 37 จึงทำให้เนื้อเทียมที่ได้มีการจัดเรียงตัวโครงสร้างภายในที่เป็นแบบเส้นใยน้อย



รูปที่ 17 ภาพถ่ายตามขวางที่กำลังขยาย 12 เท่าของเนื้อเทียมที่มีแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเป็นส่วนผสมที่ระดับ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ (ก, ข, ค, ง, จ, ฉ)



รูปที่ 18 ภาพถ่ายตามยาวที่กำลังขยาย 30 เท่าของเนื้อเทียมที่มีแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเป็นส่วนผสมที่ระดับ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ (ก, ข, ค, ง, จ, ฉ)

จากการตรวจสอบลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมที่เติม FSF ในระดับต่างๆ ด้วยวิธี Quantitative Descriptive Analysis พบว่าเนื้อเทียมที่มีส่วนประกอบของ FSF ในปริมาณต่ำ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีปริมาณไขมันต่ำประมาณ 2.7-5 เปอร์เซ็นต์ สามารถเกิดลักษณะการจัดเรียงตัวแบบเส้นใยที่ดี ดังรูปที่ 18 ข และ ค จึงทำให้เนื้อเทียมมีลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางด้านการฉีกได้และความเป็นเส้นใยสูง ซึ่งไม่แตกต่างจากเนื้อเทียมที่ไม่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม ดังแสดงในตารางที่ 37 แสดงว่าเนื้อเทียมที่มี FSF 0-20 เปอร์เซ็นต์ มีโครงสร้างภายในแบบเส้นใยคล้ายคลึงกัน จึงทำให้เนื้อเทียมทั้งสามชนิดนี้มีความเครียดใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นไปในทางเดียวกันกับ Cumming และคณะ (1972) ที่อ้างว่าการที่โปรตีนในเนื้อเทียมมีการจัดเรียงตัวเป็นเส้นใยที่ดี จำเป็นต้องใช้แรงที่ทำให้ผลิตภัณฑ์แตกหักมาก และสอดคล้องกับผลการทดลองของ Keams และคณะ (1989) ที่พบว่าวัตถุที่มีปริมาณไขมัน 0.5-6.0 เปอร์เซ็นต์ สามารถนำมาแปรรูปเนื้อเทียมด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันได้ โดยอาจต้องปรับสภาวะในการทำเอกซ์ทรูชันให้มีพลังงานในการเคลื่อนเพิ่มขึ้น และใช้อุณหภูมิในการแปรรูปให้สูงขึ้น

ตารางที่ 37 ตัวแปรของกระบวนการเอกซ์ทรูชัน และลักษณะทางกายภาพของเนื้อเทียมที่มีแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเป็นส่วนผสมในระดับ 0-50 เปอร์เซ็นต์

| Parameters and Characteristics | Full fat soy flour (%) |         |         |         |          |         |
|--------------------------------|------------------------|---------|---------|---------|----------|---------|
|                                | 0                      | 10      | 20      | 30      | 40       | 50      |
| Torque (%)                     | 46.88a <sup>(1)</sup>  | 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 <sup>2</sup> )    | 2,232ab                | 1,978ab | 1,647b  | 1,672b  | 1,895ab  | 2,456a  |
| Textural appearance score      |                        |         |         |         |          |         |
| - Tearing                      | 7.89a                  | 6.15a   | 6.37a   | 2.28b   | 1.96b    | 1.46b   |
| - Fibrousness                  | 7.17a                  | 7.07ab  | 6.48abc | 4.30cd  | 4.02cd   | 2.59d   |

<sup>(1)</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวนอนหมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

จากผลการทดลองในตารางที่ 37 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ FSF จาก 30 เป็น 50 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ลักษณะการฉีกได้และความเป็นเส้นใยของเนื้อเทียมลดลงมาก ( $p < 0.05$ ) อาจเป็นผลจากการผสมวัตถุดิบที่มี FSF ในปริมาณมากขึ้นทำให้มีน้ำมันถั่วเหลืองประมาณ 7-10 เปอร์เซ็นต์ โดยแรงเฉือนทำให้น้ำมันหลุดแยกออกจากส่วนผสม น้ำมันเป็นสารหล่อลื่นที่ไปลดแรงเสียดทาน และแรงทอร์คในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (Camier, 2000) เห็นได้จากการที่ค่าทอร์คและความดันที่หัวแบบของโคที่มีปริมาณ FSF ในระดับสูงมีค่าลดลงมาก ( $p < 0.05$ ) ดังแสดงในตารางที่ 37 จึงอาจทำให้ความดันไม่เพียงพอต่อการสร้างเนื้อสัมผัสแบบเส้นใยของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม (Cheftel et al., 1992; Lin, Huff,

and Hsieh, 2000, 2002) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Singh และ Smith (1998) ที่พบว่าคาร์ดิอีนน้ำมันจากจมูกข้าวสาลี (wheat germ oil) ในเอกซ์ทรูเดตสตาร์ชและเอกซ์-ทรูเดตแป้งสาลี ทำให้ค่าทอร์คของการเอกซ์ทรูชันลดลง นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากการที่ไขมันสามารถไปรบกวนการรับน้ำเข้าสู่โครงสร้างของโดเนื้อเทียมในระหว่างการผสม ทำให้การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขององค์ประกอบต่างๆ ของวัตถุดิบ ซึ่งนำไปสู่การสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมเป็นไปได้ยาก จึงทำให้เนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของ FSF ในปริมาณสูงมีเนื้อสัมผัสที่ไม่ดีนัก โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างการสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมกลุ่มนี้นั้น อาจเกี่ยวข้องกับกรณีที่ไขมันสามารถทำอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิกกับโปรตีนได้ จึงทำให้การจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างสายยาวแบบร่างแหหลายสามมิติของโปรตีนตัวเหลืองและการจัดเรียงตัวแบบสายยาวของโปรตีนสาลีเป็นไปได้ยาก และไขมันอาจไปเคลือบโมเลกุลของคาร์โบไฮเดรตไว้ ทำให้คาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำได้ไม่สามารถกระจายตัวไปตามส่วนต่างๆ ของโครงสร้างหลักของโดได้ รวมทั้งการที่ไขมันอาจไปลดการแตกแยกของเม็ดแป้งของสตาร์ชสาลี จึงทำให้มีโมเลกุลสตาร์ชที่สามารถไปจัดเรียงตัวควบคู่กับโมเลกุลสายยาวของโปรตีนตัวเหลืองลดลง ทั้งหมดนี้อาจส่งผลให้โดมีความยืดหยุ่นลดลง เนื้อเทียมจึงไม่พองตัวเมื่อผ่านออกจากหัวแบบรวมทั้งเนื้อเทียมมีลักษณะทางด้านการฉีกได้และความเป็นเส้นใยลดลง จึงพบว่าเนื้อเทียมที่เติมแป้งตัวเหลืองไขมันเต็มในปริมาณมากมีลักษณะเนื้อสัมผัสคล้ายของกึ่งแข็งกึ่งเหลวขึ้น ดังรูปที่ 18 ง-ฉ ข้างต้น ซึ่งเป็นไปในทางเดียวกับรายงานของ Guy (1994, 2001) ที่พบว่าเนื้อสัมผัสของเอกซ์ทรูเดตสตาร์ชที่มีส่วนผสมของน้ำมันเพิ่มขึ้น มีลักษณะคล้ายบิสกิต (biscuit-like texture) เนื่องจากไขมันไปเคลือบเม็ดแป้งไว้ ทำให้ลดการแตกแยกของโครงสร้างของเม็ดแป้ง จึงทำให้การกระจายตัวของโมเลกุลอะมิโลสและอะมิโลเพคตินที่เป็นโครงสร้างหลักของเอกซ์ทรูเดตลดลง ทำให้เอกซ์ทรูเดตไม่พองตัว

จากการตรวจสอบเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมที่มี FSF เป็นส่วนผสม ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ดังแสดงในตารางที่ 37 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 ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 17 ฉ และรูปที่ 18 ฉ จึงทำให้เนื้อเทียมมีอัตราการขยายตัวต่ำมาก ดังแสดงในตารางที่ 38 จึงทำให้เนื้อเทียมมีเนื้อสัมผัสที่แน่นแข็ง

### 3.6.3 ลักษณะทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่

จากการวัดลักษณะทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของเนื้อเทียมที่มี FSF เป็นส่วนผสมที่ระดับ 0-50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงข้อมูลในตารางที่ 38 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) ที่พบว่า การเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวโพดทั้งเมล็ดที่มีส่วนผสมของน้ำมันถั่วเหลือง 3-4 เปอร์เซ็นต์ ทำให้อัตราการขยายตัวตามขวางของเอกซ์ทรูเดตเพิ่มขึ้น 2-4 เท่า ซึ่งอาจเป็นผลจากไขมันมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนให้กับโด ทำให้ห้องค้ประกอบของโดได้รับความร้อนอย่างทั่วถึง นอกจากนี้อาจเป็นผลมาจากการเป็นสารหล่อลื่นของไขมันซึ่งทำให้สามารถดำเนินการแปรรูปได้อย่างสม่ำเสมอ จึงเกิดการสร้างเนื้อสัมผัสได้ดี โดย Guy (1994) พบว่าการเติมน้ำมันจากถั่วเหลือง ข้าวโพด และเมล็ดเรพ (rape seed) ในระดับ 0.5-1 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เนื้อเทียมมีการพองตัวมาก เนื่องจากโพลีเมอร์สตาร์ชเกิดการเลื่อนไหลได้ดีภายในบารเรล ทำให้โดที่เกิดขึ้นไม่มีลักษณะคล้ายยางยืดเหนียวที่อาจไปยึดติดบารเรลได้ จึงทำให้โดไม่เกิดการไหม้ติดบารเรลขึ้น ส่งผลให้สามารถดำเนินการกระบวนการเอกซ์ทรูชันได้ตามปกติ ดังนั้นเนื้อเทียมที่มีแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเป็นส่วนผสม 0-20 เปอร์เซ็นต์ มีไขมันประมาณ 1-5 เปอร์เซ็นต์ อาจเป็นระดับที่ทำให้สามารถดำเนินการกระบวนการเอกซ์ทรูชันได้ตามปกติ เนื้อเทียมที่ได้มีเนื้อสัมผัสแข็งแรง มีอัตราการขยายตัวสูง จึงมีความสามารถในการกักเก็บน้ำสูงเพราะมีช่องรูพรุนในโครงสร้างเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ความหนาแน่นจำเพาะของเนื้อเทียมต่ำ ( $p < 0.05$ ) ดังแสดงในตารางที่ 38 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bhattacharya และคณะ (1988) ที่พบว่าเอกซ์ทรูเดตที่มีปริมาณไขมันต่ำ มีอัตราการขยายตัวสูงกว่าเอกซ์ทรูเดตที่มีปริมาณไขมันสูง จึงทำให้เอกซ์ทรูเดตที่มีปริมาณไขมันต่ำนั้นมีความสามารถในการเก็บกักน้ำสูงกว่าตามไปด้วย แต่จากการทดลองแสดงให้เห็นให้ว่าเมื่อระดับ FSF ในเนื้อเทียมสูงกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้เนื้อเทียมมีอัตราการขยายตัวลดลงมาก ( $p < 0.05$ ) ดังแสดงในตารางที่ 38 Guy และ Home (1988) กล่าวว่าอัตราการขยายตัวของผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเดตขึ้นอยู่กับสมบัติด้านความยืดหยุ่นขององค์ประกอบแต่ละชนิดในวัตถุดิบ ดังนั้นการที่เอกซ์ทรูเดตที่มีส่วนผสมของ FSF ในปริมาณมาก มีอัตราการขยายตัวลดลง แสดงว่าโครงสร้างของโดมีความยืดหยุ่นลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากไขมันที่ไปลดการสร้างโครงสร้างหลักของโด รวมทั้งลดการกระจายตัวของโปรตีนและสตาร์ชซาลี ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่เกิดการขยายตัวเมื่อออกสู่ภายนอกเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (Mohamed, 1990; Guy, 1994) เนื้อเทียมที่ได้เกิดลักษณะเนื้อสัมผัสที่เกาะตัวกันแน่นทึบ ไม่เกิดโครงสร้างแบบเส้นใย มีช่องรูพรุนขนาดเล็กและไม่พองตัว จึงทำให้เนื้อเทียมที่มี FSF สูงจาก 30 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ มีความหนาแน่นจำเพาะเพิ่มขึ้น มีความสามารถในการกักเก็บน้ำลดลง ( $p < 0.05$ ) (ตารางที่ 38) ซึ่งก็แสดงผลต่อลักษณะความแข็งแรงของเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมที่มีปริมาณ FSF สูงก็มีความเครียดสูงตามไปด้วย (ตารางที่ 37) โดยสอดคล้องกับผลการทดลองของ Hayter และคณะ (1986, 1987) ที่พบว่าความ



หนาแน่นจำเพาะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเครียด โดยเอกซ์ทรูเดตที่มีความหนาแน่นจำเพาะสูงมีโครงสร้างที่หนาแน่น ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความเครียดสูง

ตารางที่ 38 ลักษณะทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของเนื้อเทียมที่มีแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเป็นส่วนผสมในระดับ 0- 50 เปอร์เซ็นต์

| Functional properties              | Full fat soy flour (%) |         |          |         |         |         |
|------------------------------------|------------------------|---------|----------|---------|---------|---------|
|                                    | 0                      | 10      | 20       | 30      | 40      | 50      |
| Expansion ratio                    | 2.38a <sup>(1)</sup>   | 2.53a   | 2.48a    | 1.90b   | 1.72bc  | 1.53c   |
| Piece density (g/cm <sup>3</sup> ) | 0.395bc                | 0.266cd | 0.186d   | 0.283cd | 0.498ab | 0.602a  |
| Water holding capacity (%)         | 281ab                  | 306a    | 316a     | 280ab   | 261b    | 264b    |
| Integrity index                    | 0.82a                  | 0.64ab  | 0.61b    | 0.48bc  | 0.33bc  | 0.66ab  |
| Color                              |                        |         |          |         |         |         |
| - L                                | 74.26a                 | 73.16ab | 72.40abc | 70.26bc | 71.09cd | 67.96d  |
| - a                                | +3.81b                 | +4.43ab | +4.29b   | +5.09a  | +4.24b  | +4.35ab |
| - b                                | +28.18d                | +30.39c | +31.74c  | +34.14b | +34.13b | +36.38a |

<sup>(1)</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวอนหมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

จากการวัดดัชนีความสมบูรณ์ของโครงสร้างของเนื้อเทียมที่เติม FSF เพิ่มขึ้นจาก 0-40 เปอร์เซ็นต์ พบว่าดัชนีความสมบูรณ์ของโครงสร้างมีค่าลดลง ( $p < 0.05$ ) แสดงว่าความสมบูรณ์ของการก่อตัวเป็นเนื้อเดียวกัน โครงสร้างเนื้อเทียมลดลง โดยอาจเป็นผลมาจากการที่เนื้อเทียม FSF เป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้น มีการจัดเรียงตัวแบบร่างแหเส้นใยที่สมบูรณ์น้อยลง ดังเห็นได้จากรูปที่ 17 ง, จ, และ ฉ และ รูปที่ 18 ง, จ, และ ฉ ข้างต้น เนื่องจากไขมันมีส่วนไปลดการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของโปรตีนลง ทำให้โครงสร้างหลักที่เป็นเส้นใยของเนื้อเทียมไม่แข็งแรง (Guy, 1994) จึงเกิดการสูญเสียโครงสร้างของเนื้อเทียมอย่างง่ายดายเมื่อได้รับความร้อนและความดันสูง แต่เนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของ FSF 50 เปอร์เซ็นต์ มีดัชนีความสมบูรณ์ของโครงสร้างสูงไม่แตกต่างทางสถิติกับเนื้อเทียมที่มี FSF เป็นส่วนผสมในระดับ 0 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ( $p > 0.05$ ) ซึ่งสอดคล้องกับการที่เนื้อเทียมที่มี FSF 50 เปอร์เซ็นต์ เป็นส่วนผสมมีเนื้อสัมผัสที่แข็งกว่าเนื้อเทียมชนิดอื่นๆ สังเกตได้จากค่าความเครียดของเนื้อเทียมดังตารางที่ 37 ซึ่งอาจเป็นเพราะเนื้อเทียมไม่พองตัว เนื้อสัมผัสเกาะตัวกันแน่น ทำให้น้ำไม่สามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างได้ จึงทำให้โครงสร้างของเนื้อเทียมไม่ถูกทำลายเมื่อได้รับความร้อนและความดันสูง

เมื่อวัดสีของเนื้อเทียมในระบบ L, a, b ด้วยเครื่องวัดสี พบว่าเมื่อปริมาณแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความสว่าง (L) ของเนื้อเทียมลดลงมาก ( $p < 0.05$ ) และมีสีเหลือง (+b) มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Badrie และ Mellowes (1992) ที่พบว่าเมื่อเติมน้ำมันถั่วเหลือง

เพิ่มขึ้นถึง 4 เปอร์เซ็นต์ ในแป้งมันสำปะหลัง ทำให้เอกซ์ทรูเดทมีสีเหลืองมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลจากการที่น้ำมันถั่วเหลืองได้รับความร้อน ออกซิเจน และน้ำในการผสม ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (นิธิยรัตน์นาปนนท์, 2543) ส่งผลให้เนื้อเทียมที่มีแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มสูงมีสีเหลืองออกน้ำตาลคล้ำมากกว่าเนื้อเทียมชนิดอื่นๆ ส่วนสีแดง (+a) ของเนื้อเทียมที่เติมแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มที่ระดับต่างๆ มีค่าไม่แตกต่างทางสถิติกับเนื้อเทียมที่ไม่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม ( $p > 0.05$ )

### 3.7 ผลของสภาวะการเอกซ์ทรูชันต่อลักษณะทางกายภาพ

#### 3.7.1 ผลการศึกษาเบื้องต้น

จากการศึกษาช่วงระดับของตัวแปรของการเอกซ์ทรูชันเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่าความชื้นโดยรวมของการเอกซ์ทรูชันในช่วง 25-35 เปอร์เซ็นต์ เป็นสภาวะที่สามารถแปรรูปผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่ได้มีลักษณะทางกายภาพที่ดี เอกซ์ทรูเดทเกิดการขยายตัวเมื่อผ่านออกจากหน้าแปลน เมื่อลดความชื้นโดยรวมของการแปรรูปลงพบว่าเอกซ์ทรูเดทที่ได้มีอัตราการขยายตัวมาก จนมีลักษณะคล้ายขนมขบเคี้ยวมากกว่าที่จะแสดงลักษณะของเนื้อเทียม เมื่อเพิ่มความชื้นให้สูงขึ้นพบว่าเอกซ์ทรูเดทไม่พองตัวและไม่สร้างเนื้อสัมผัส จากการศึกษาระดับของความเร็วยรอบของสกรูพบว่าที่ระดับความเร็วรอบ 250-350 รอบต่อนาที เป็นระดับที่สามารถนำมาศึกษาได้โดยระดับความเร็วรอบที่ต่ำกว่า 250 รอบต่อนาที จะทำให้วัสดุคืบลื่นออกมาจากบารเรล เนื่องจากสกรูไม่สามารถพาวัสดุคืบผ่านบารเรล และกลายเป็นผลิตภัณฑ์ออกสู่ภายนอกเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ได้ทันกับการป้อนวัสดุคืบเข้า ซึ่งได้ตั้งอัตราการป้อนวัสดุคืบที่ระดับคงที่ที่ 65 กรัมต่อนาที ส่วนการเพิ่มระดับความเร็วรอบสกรูให้สูงกว่า 350 รอบต่อนาที นั้นไม่สามารถควบคุมการเดินเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ให้เป็นปกติได้ เนื่องจากมีวัสดุคืบน้อยเกินไปทำให้สกรูไม่เต็ม ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ออกมาจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์เป็นขาดช่วงไป เมื่อศึกษาอุณหภูมิของบารเรลพบว่าที่ระดับ 160-170 องศาเซลเซียส เป็นระดับที่สามารถนำมาศึกษาได้ เมื่อตั้งอุณหภูมิของบารเรลต่ำกว่า 160 องศาเซลเซียส พบว่าเนื้อเทียมไม่พองตัวและไม่สร้างเนื้อสัมผัสที่มีลักษณะเหนียว ส่วนการตั้งอุณหภูมิของบารเรลที่ส่วนสุดท้ายเป็น 180 องศาเซลเซียสนั้น จะไม่สามารถดำเนินเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ได้เป็นปกติ มีการติดขัดเป็นช่วงๆ เนื่องจากวัสดุคืบได้รับความร้อนสูงจนทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ออกมาที่มีส่วนที่ไหม้และขาดออกจากกัน จนไม่สามารถบันทึกปริมาณผลผลิต (production rate) ได้

#### 3.7.2 ตัวแปรตามของการแปรรูปเอกซ์ทรูชัน

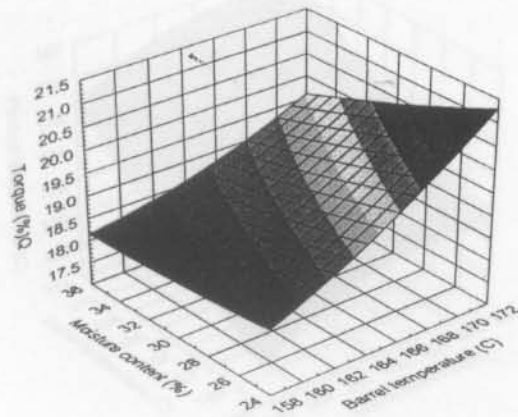
จากการแปรรูปเนื้อเทียมที่เติมแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม 20 เปอร์เซ็นต์ ด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันใน 12 สภาวะการทดลอง จำนวน 2 ชั่วโมง แสดงค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามในการเอกซ์ทรูชันดังตารางที่ 39 การทดสอบทางสถิติโดยการจัดวางทรีดเมนต์แบบแฟคทอเรียลในแผนการทดลองแบบ CRD พบว่าปัจจัยด้านอุณหภูมิบารเรล ความเร็วรอบสกรู และความชื้น ไม่มีผลต่อแรงทอร์ค ( $p > 0.05$ ) ซึ่ง

สังเกตเห็นได้จากตารางที่ 39 ว่าค่าทอร์คมีค่าอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกันมาก (17.5-21.0%) เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยพร้อมทั้งทำกราฟตอบสนองแบบ 3 มิติ ดังรูปที่ 19 ซึ่งพบว่า การลดความชื้นในการแปรรูปลง ทำให้แรงทอร์คเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาถึงการเพิ่มอุณหภูมิบาเรลจาก 160 เป็น 170 องศาเซลเซียส ที่ระดับความชื้นคงที่ ทำให้ทอร์คเพิ่มขึ้นเพียง 1 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น แสดงให้เห็นว่าช่วงระดับของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองนี้ไม่มีผลต่อแรงทอร์คในการแปรรูปเนื้อเทียม

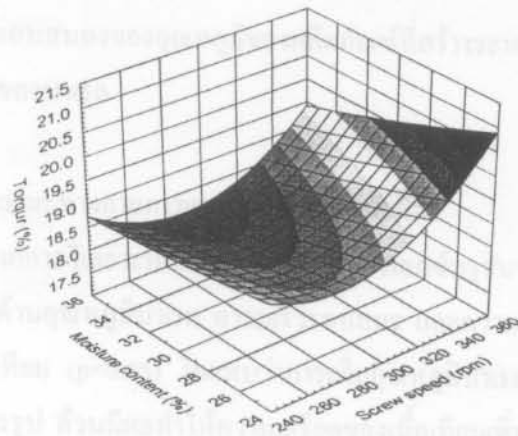
ตารางที่ 39 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรของการแปรรูปเอกซ์ทรูชันเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลือง ไขมันเต็ม 20 เปอร์เซ็นต์

| Condition No. | Barrel Temperature (°C) | Screw Speed (rpm) | Moisture Content (%) | Torque (%) | Product Temperature (°C) |
|---------------|-------------------------|-------------------|----------------------|------------|--------------------------|
| 1             | 160                     | 250               | 25                   | 17.50      | 172.00ab                 |
| 2             | 160                     | 250               | 30                   | 18.33      | 170.83ab                 |
| 3             | 160                     | 250               | 35                   | 18.00      | 167.84b                  |
| 4             | 160                     | 350               | 25                   | 19.67      | 172.67ab                 |
| 5             | 160                     | 350               | 30                   | 19.00      | 172.67ab                 |
| 6             | 160                     | 350               | 35                   | 18.34      | 171.67ab                 |
| 7             | 170                     | 250               | 25                   | 20.50      | 175.17ab                 |
| 8             | 170                     | 250               | 30                   | 19.17      | 174.84ab                 |
| 9             | 170                     | 250               | 35                   | 19.00      | 178.17a                  |
| 10            | 170                     | 350               | 25                   | 21.00      | 177.17a                  |
| 11            | 170                     | 350               | 30                   | 20.34      | 177.50a                  |
| 12            | 170                     | 350               | 35                   | 20.00      | 178.17a                  |

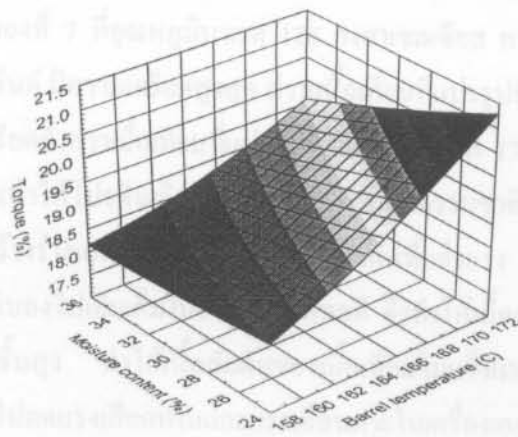
จากการศึกษาผลกระทบของตัวแปรในการเอกซ์ทรูชันต่ออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ด้วยการจัดวางทริตเมนต์แบบแฟกทอเรียล พบว่าอุณหภูมิบาเรลที่ 170 องศาเซลเซียส ทำให้มีอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สูงกว่าที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ( $p < 0.05$ ) แต่จากผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ในระหว่าง 12 สภาวะการทดลอง พบว่าอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตที่อุณหภูมิแตกต่างกันโดยส่วนใหญ่ไม่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) และเมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยพร้อมทั้งทำกราฟตอบสนองแบบ 3 มิติดังรูปที่ 20 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิบาเรลให้สูงขึ้นนั้น มีผลทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เพิ่ม โดยเฉลี่ยประมาณ 5 - 6 องศาเซลเซียส



ก

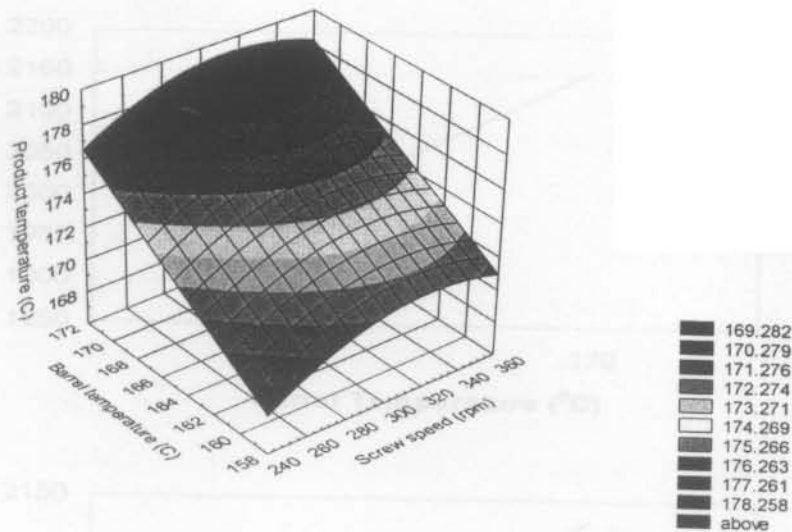


ข



ค

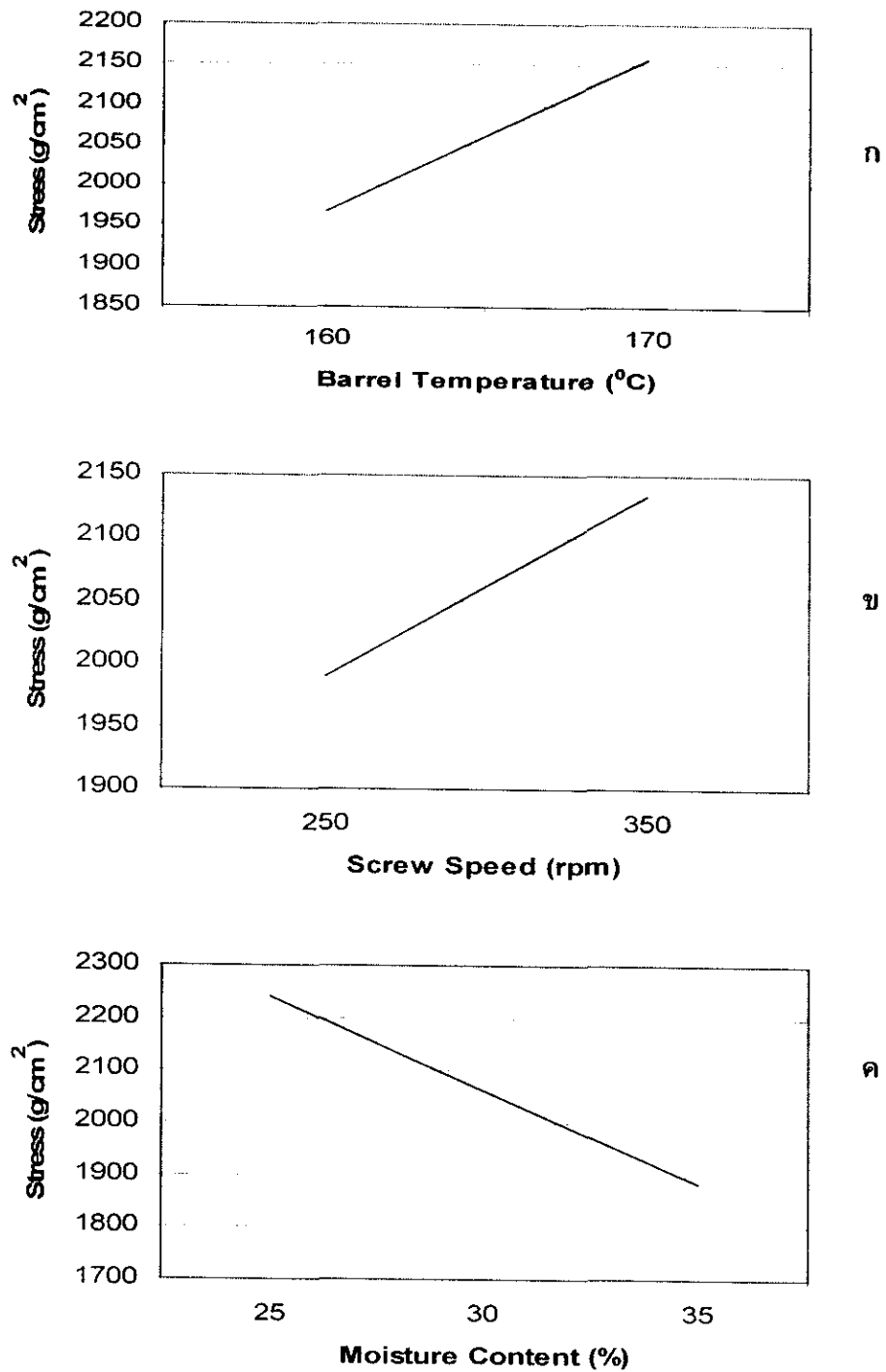
รูปที่ 19 พื้นที่ผิวตอบสนองของทอร์คที่สร้างระหว่างความชื้นวัตถุดิบและอุณหภูมิบาเรล (ก) ระหว่างความชื้นและความเร็วรอบสกรู (ข) และระหว่างความชื้นและอุณหภูมิบาเรล (ค)



รูปที่ 20 พื้นที่ผิวตอบสนองของอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่สร้างระหว่างความเร็วรอบและอุณหภูมิของบารเรล

### 3.7.3 ลักษณะทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่

จากการวิเคราะห์ผลของตัวแปรในการเอกซ์ทรูชันที่มีต่อความเครียดของเนื้อเทียม พบว่าทั้งปัจจัยทางด้านอุณหภูมิบารเรล ความเร็วรอบสกรู และความชื้น มีผลกระทบต่อความเครียดของเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียม ( $p < 0.05$ ) โดยพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิบารเรลและความเร็วรอบสกรู และการลดความชื้นในการแปรรูป ล้วนมีผลทำให้ความเครียดของเนื้อเทียมเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 21 และจากค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ของเนื้อเทียมทั้ง 12 สภาวะ ดังแสดงในตารางที่ 40 พบว่าเนื้อเทียมจากสภาวะการทดลองที่ 7 ที่อุณหภูมิบารเรล 170 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที และความชื้น 25 เปอร์เซ็นต์ มีความเครียดสูงสุด ส่วนเนื้อเทียมที่แปรรูปที่อุณหภูมิบารเรล 160 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่มีความเครียดต่ำกว่าเนื้อเทียมที่แปรรูปที่อุณหภูมิบารเรล 170 องศาเซลเซียส ซึ่งอาจเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้โปรตีนเกิดการสูญเสียสภาพทางธรรมชาติได้มากขึ้น จึงทำให้เกิดการจัดเรียงตัวกลายเป็นโครงสร้างร่างแหที่แน่น กลายเป็นเนื้อสัมผัสที่แข็งแรง ส่วนการเพิ่มความเร็วรอบสกรูนั้น อาจมีผลทำให้วัสดุบิดลงไปเต็มเต็มในร่องสกรูได้พอดี จึงทำให้เนื้อเทียมมีเนื้อสัมผัสที่ดี และเมื่อแปรรูปเนื้อเทียมที่ความชื้นสูง ทำให้เนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมไม่แข็งแรง เนื่องจากน้ำที่เป็นสารหล่อลื่นภายในระบบนั้นจะ ไปลดแรงเสียดทานและแรงเฉือนภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ลง ทำให้การสร้างเนื้อสัมผัสลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าค่า  $R^2$  ที่ได้จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการเอกซ์ทรูชันกับความเครียดมีค่าต่ำมากจึงไม่สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์และกราฟตอบสนองแบบสามมิติได้

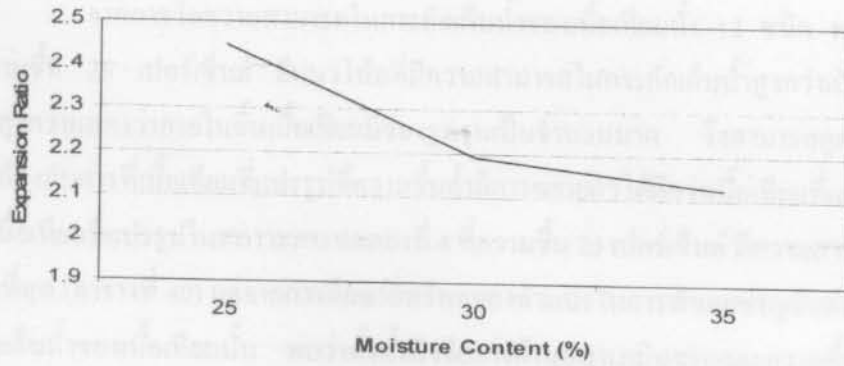


รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอุณหภูมิของบาร์เรล (ก)  
ความเร็วรอบของสกรู (ข) และความชื้น (ค)

ตารางที่ 40 ค่าเฉลี่ยของสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม 20 เปอร์เซ็นต์

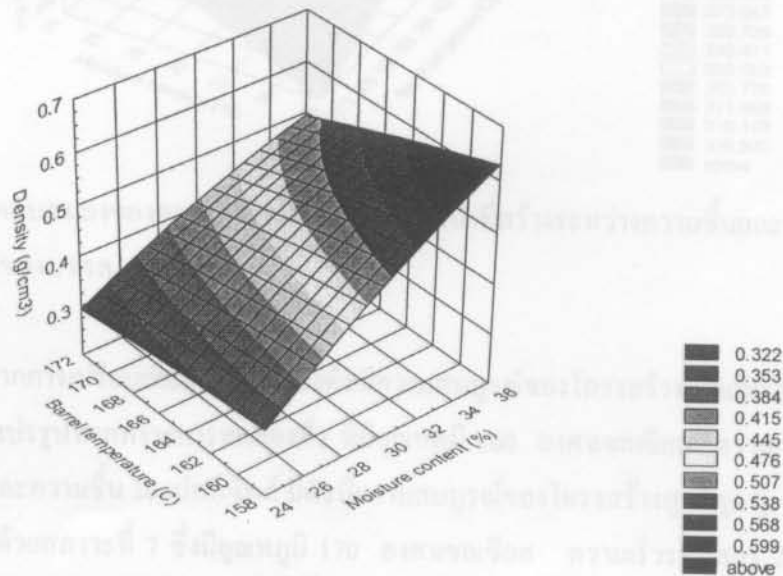
| Condition No. | Stress (g/cm <sup>2</sup> ) | Expansion ratio | Water holding Capacity (%) | Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Integrity index |
|---------------|-----------------------------|-----------------|----------------------------|------------------------------|-----------------|
| 1             | 2,233ab                     | 2.38            | 321ab                      | 0.371e                       | 0.730b          |
| 2             | 1,808d                      | 2.19            | 305abcd                    | 0.484cd                      | 0.815a          |
| 3             | 1,495e                      | 2.14            | 293abcd                    | 0.544b                       | 0.488ef         |
| 4             | 2,127b                      | 2.47            | 332a                       | 0.361e                       | 0.541de         |
| 5             | 2,080bc                     | 2.45            | 314abc                     | 0.444d                       | 0.649bc         |
| 6             | 2,064bc                     | 2.08            | 274cd                      | 0.667a                       | 0.445fg         |
| 7             | 2,376a                      | 2.59            | 288abcd                    | 0.347e                       | 0.399g          |
| 8             | 2,177ab                     | 2.54            | 273cd                      | 0.448d                       | 0.706b          |
| 9             | 1,855cd                     | 2.11            | 260d                       | 0.512bc                      | 0.673bc         |
| 10            | 2,229cd                     | 2.36            | 293abcd                    | 0.274f                       | 0.589cd         |
| 11            | 2,180ab                     | 2.16            | 286bcd                     | 0.448d                       | 0.690b          |
| 12            | 2,126b                      | 2.16            | 259a                       | 0.450cd                      | 0.673bc         |

เมื่อศึกษาผลของตัวแปรในการเอกซ์ทรูชันต่ออัตราการขยายตัวของเนื้อเทียมพบว่าความชื้นมีผลต่ออัตราการขยายตัวของเนื้อเทียม ดังรูปที่ 22 โดยพบว่าที่ความชื้นในระดับต่ำ ทำให้เนื้อเทียมมีอัตราการขยายตัวสูงกว่าเนื้อเทียมที่แปรรูปที่ระดับความชื้นสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ซึ่งเป็นผลมาจากน้ำที่ไปลดความดันและความร้อนในระบบลง ดังสังเกตได้จากค่าทอร์คและอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ทำให้ความสามารถในการยึดหยุ่นของโคเนื้อเทียมลดลง รวมทั้งการเป็นไอน้ำร้อนยิ่งยวดลดลง ทำให้เนื้อเทียมมีการขยายตัวน้อยหลังผ่านหัวแบบออกมาสู่ภายนอก แต่เมื่อพิจารณาผลจากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของอัตราการขยายตัวของเนื้อเทียมทั้ง 12 ชนิด พบว่าเนื้อเทียมทุกชนิดมีอัตราการขยายตัวไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ดังแสดงในตารางที่ 40 แสดงว่าสภาวะการผลิตทั้ง 12 สภาวะนี้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราการขยายตัวของเนื้อเทียมน้อยมาก นอกจากนี้ยังพบว่าค่า  $R^2$  ที่ได้จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการเอกซ์ทรูชันกับอัตราการขยายตัวมีค่าต่ำมาก จึงไม่สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์และกราฟตอบสนองแบบสามมิติได้



รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับอัตราขยายตัวของเนื้อเทียม

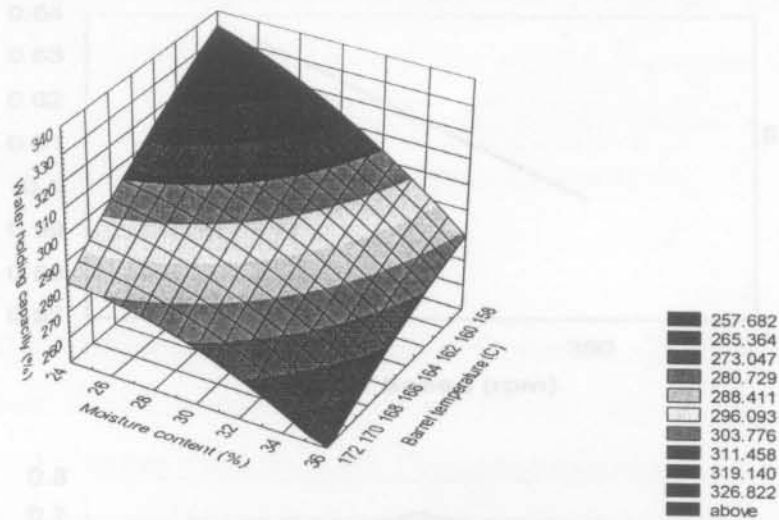
เมื่อตรวจสอบความหนาแน่นของเนื้อเทียมทั้ง 12 ชนิดดังแสดงในตารางที่ 40 พบว่าเนื้อเทียมที่แปรรูปด้วยสภาวะที่ 6 ซึ่งมีอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบสกรู 350 รอบต่อนาที และความชื้น 35 เปอร์เซ็นต์ มีความหนาแน่นจำเพาะสูงที่สุด ( $p < 0.05$ ) แสดงว่าเนื้อเทียมชนิดนี้มีช่องรูพรุนน้อย เนื้อสัมผัสเกาะตัวใกล้ชิดกันมาก ซึ่งสอดคล้องกับการที่เนื้อเทียมชนิดนี้มีความสามารถในการกักเก็บน้ำก่อนข้างต่ำ (ตารางที่ 40) ส่วนเนื้อเทียมที่แปรรูปด้วยสภาวะ 10 ซึ่งมีอุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบสกรู 350 รอบต่อนาที และความชื้น 25 เปอร์เซ็นต์ มีความหนาแน่นจำเพาะต่ำที่สุด ( $p < 0.05$ ) แสดงว่าอุณหภูมิและความชื้นมีผลต่อความหนาแน่นของเนื้อเทียม ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยแฟกทอเรียล และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบาร์เรลและความชื้นที่มีต่อความหนาแน่นของเนื้อเทียมดังภาพที่ 3.12



รูปที่ 23 พื้นที่ผิวตอบสนองของความหนาแน่นที่สร้างระหว่างความชื้นและอุณหภูมิของบาร์เรล



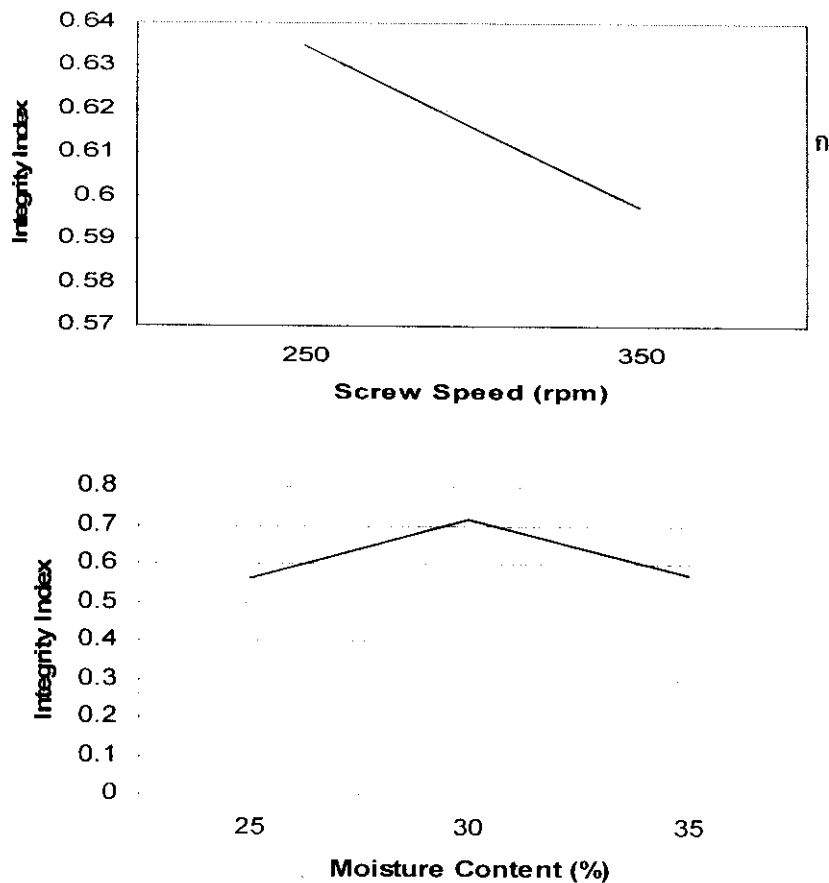
จากการวัดความสามารถในการกักเก็บน้ำของเนื้อเทียมทั้ง 12 ชนิด พบว่าเนื้อเทียมที่ผลิตที่ความชื้น 25 เปอร์เซ็นต์ มีแนวโน้มที่มีความสามารถในการกักเก็บน้ำสูงกว่าเนื้อเทียมที่ผลิตที่ความชื้นสูงกว่าแสดงว่าภายในชั้นเนื้อเทียมมีช่องรูพรุนเป็นจำนวนมาก จึงสามารถดูดซับน้ำไว้ได้สูง ซึ่งสอดคล้องกับการที่เนื้อเทียมที่แปรรูปที่ความชื้นต่ำมีการขยายตัวได้ดีกว่าเนื้อเทียมที่แปรรูปที่ความชื้นสูง โดยเนื้อเทียมที่แปรรูปในสภาวะการทดลองที่ 4 ที่ความชื้น 25 เปอร์เซ็นต์ มีความสามารถในการกักเก็บน้ำสูงที่สุด (ตารางที่ 40) แต่จากการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการทำเอกซทรูชันต่อความสามารถในการกักเก็บน้ำของเนื้อเทียมนั้น พบว่าทั้งปัจจัยทางด้านอุณหภูมิบารเรลและความชื้นมีความสำคัญต่อความสามารถในการกักเก็บน้ำของเนื้อเทียม โดยเฉพาะอุณหภูมิบารเรลและความชื้นในการแปรรูปเพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการกักเก็บน้ำลดลง ซึ่งสอดคล้องกับกราฟดังรูปที่ 24 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่เนื้อเทียมที่มีความชื้นในการแปรรูปต่ำและแปรรูปที่อุณหภูมิสูงอาจมีการขยายตัวได้ดี มีช่องรูพรุนมาก ดังที่สอดคล้องกับผลของความหนาแน่นในรูปที่ 23



รูปที่ 24 พื้นที่ผิวคอบสนองของความสามารถในการกักเก็บน้ำที่สร้างระหว่างความชื้นและอุณหภูมิของบารเรล

จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของดัชนีความสมบูรณ์ของโครงสร้างเนื้อเทียมทั้ง 12 ชนิด พบว่า เนื้อเทียมที่แปรรูปในสภาวะการทดลองที่ 2 ที่มีอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบสกรู 250 รอบต่อนาที และความชื้น 30 เปอร์เซ็นต์ มีดัชนีความสมบูรณ์ของโครงสร้างสูงที่สุด ( $p < 0.05$ ) ส่วนเนื้อเทียมที่แปรรูปด้วยสภาวะที่ 7 ซึ่งมีอุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบสกรู 250 รอบต่อนาที และความชื้น 25 เปอร์เซ็นต์ มีดัชนีความสมบูรณ์ของโครงสร้างน้อยที่สุด ( $p < 0.05$ ) และจากผลการวิเคราะห์ตัวแปรแบบแฟกทอเรียล พบว่าทั้งความเร็วรอบสกรูและความชื้นมีผลต่อดัชนีความสมบูรณ์ของโครงสร้าง โดยพบว่าที่ความเร็วรอบสกรู 250 รอบต่อนาที ทำให้เนื้อเทียมมีดัชนีความ

สมบรูณ์ของโครงสร้างสูงกว่าที่ความเร็วรอบสกรู 350 รอบต่อนาที และที่ความชื้น 30 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เนื้อเทียมมีดัชนีความสมบรูณ์ของโครงสร้างสูงกว่าที่ความชื้น 25 และ 35 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 25 ซึ่งตรงข้ามกับผลจากการวัดค่าความเครียดของเนื้อเทียมอย่างชัดเจน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากวัตถุประสงค์ของการวัดแตกต่างกัน โดยความเครียดนั้นเป็นการวัดความแข็งแรงของโครงสร้างเนื้อสัมผัสในระดับใหญ่ (macrostructure) ส่วนดัชนีความสมบรูณ์นั้นเป็นการวัดความแข็งแรงทนทานของโครงสร้างทั้งขนาดใหญ่และโครงสร้างขนาดเล็กที่อยู่ภายในชั้นเนื้อเทียม (microstructure) เนื่องจากวิธีการนี้มีการบดตัวอย่างก่อนที่จะนำไปแช่น้ำซึ่งส่งผลให้โครงสร้างอ่อนตัวลง และทำลายโครงสร้างด้วยการให้ความร้อนสูงในสภาวะที่มีความชื้น ดังนั้นเนื้อเทียมที่มีดัชนีความสมบรูณ์ของโครงสร้างสูง แสดงว่าเนื้อเทียมมีโครงสร้างที่เรียงเกาะเชื่อมต่อกันอย่างแน่นหนา จึงอาจกล่าวได้ว่าเนื้อเทียมที่ทำการเอกซเรย์ที่ความเร็วรอบสกรู 250 รอบต่อนาที และมีความชื้นในการแปรรูปเป็น 30 เปอร์เซ็นต์ เป็นเนื้อเทียมที่มีโครงสร้างที่เรียงตัวสมบรูณ์แข็งแรงทนต่อการหุงต้ม



รูปที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความสมบรูณ์ของโครงสร้างกับความเร็วรอบของสกรู (ก) และความชื้นในการแปรรูป (ข)

## บทที่ 4

### บทสรุป

#### การวิเคราะห์หาสารไอโซฟลาโวนส์ในถั่วเหลืองและผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลือง

ปริมาณสารไอโซฟลาโวนส์ทั้งหมดที่พบในเมล็ดถั่วเหลืองสายพันธุ์ต่างๆในประเทศไทยมีค่าอยู่ในช่วง 1,000 - 5,000  $\mu\text{mg/g}$  (db) โดยมีปริมาณสูงสุดในถั่วเหลืองสายพันธุ์ สท.1 และมีปริมาณต่ำสุดในถั่วเหลืองสายพันธุ์ สจ.5 และสารไอโซฟลาโวนส์ที่พบส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ  $\beta$ -glucoside คือ daidzin และ genistin โดยถั่วเหลืองแต่ละสายพันธุ์มีแหล่งเพาะปลูกที่แตกต่างกันออกไป ทำให้มีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้ปริมาณสารไอโซฟลาโวนส์ที่พบมีค่าแตกต่างกันออกไป

ผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลือง ได้แก่ เนื้อเตียม และโยเกิร์ตถั่วเหลืองผง ตรวจสอบปริมาณสารไอโซฟลาโวนส์ในช่วง 750 - 1,500  $\mu\text{g/g}$  (db) โดยพบในเนื้อเตียมมากกว่าโยเกิร์ตถั่วเหลือง โครงสร้างของสารไอโซฟลาโวนส์ที่พบในเนื้อเตียมอยู่ในรูปของ  $\beta$ -glucoside คือ daidzin และ genistin สำหรับโครงสร้างของสารไอโซฟลาโวนส์ที่พบในโยเกิร์ตถั่วเหลืองอยู่ในรูปของ  $\beta$ -glucoside และ aglycone โดยมีปริมาณของสารไอโซฟลาโวนส์ในรูปของ  $\beta$ -glucoside มากกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบกับเมล็ดถั่วเหลืองพบว่า สัดส่วนสารไอโซฟลาโวนส์ในรูปของ aglycone มีปริมาณมากขึ้น

#### โยเกิร์ตถั่วเหลืองผง

การศึกษาการทำโยเกิร์ตถั่วเหลืองแบบ set yoghurt ในขั้นตอนการคัดเลือกชนิดของไฮโดรคอลลอยด์ โดยใช้ GDL สำหรับการคัดเลือกอย่างหยาบ พบว่าไฮโดรคอลลอยด์ที่ผ่านการคัดเลือก คือ 0.5% xanthan gum, 0.5% xanthan gum+LBG (0.5:1), 1% modified tapiocastarch และ 1.5% modified rice starch เนื่องจากเกิด syneresis น้อยและมีลักษณะเคิร์ดที่ไม่อ่อนและแข็งจนเกินไป

การศึกษาการเจริญเติบโตของ commercial starter culture ซึ่งเป็นเชื้อผสมระหว่าง *S.thermophilus* และ *Lb.bulgaricus* ในนมถั่วเหลืองที่มีปริมาณของแข็ง 8% พบว่ามีปริมาณเชื้อเริ่มต้นประมาณ  $10^7$  cfu/ml โดยการเจริญของ starter culture ในช่วง lag phase อยู่ช่วงชั่วโมงการบ่มที่ 1-2 ส่วนช่วง log phase อยู่ในชั่วโมงที่ 2-8 และหลังจากชั่วโมงที่ 8 เป็นการเจริญในช่วง stationary phase ซึ่งอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมต่อการบ่ม คือ  $42 \pm 1^\circ\text{C}$  เวลา 8 ชั่วโมง ได้โยเกิร์ตที่มีเคิร์ดคงตัว และมีค่า pH ประมาณ 4.89 ปริมาณกรดแลคติกประมาณ 0.87% และปริมาณเชื้อแลคติกทั้งหมด (total lactic acid bacteria) ประมาณ  $10^{11}$  cfu/ml โดยการเจริญของเชื้อ *S.thermophilus* และ *Lb.bulgaricus* มีอัตราใกล้เคียงกัน

การศึกษานิตและปริมาณของไฮโดรคอลลอยด์ที่เหมาะสมต่อการทำโยเกิร์ตถั่วเหลือง พบว่า modified tapioca starch ปริมาณ 1% และ modified rice starch ปริมาณ 1.5% เหมาะสมต่อการทำ

โยเกิร์ตถั่วเหลือง เนื่องจากให้โยเกิร์ตที่มีความแข็งของกึ่งตัวสุดท้าย มีลักษณะเนื้อสัมผัสค่อนข้างเนียนละเอียด และเกิด syneresis น้อย การเพิ่มปริมาณของแข็งในนมถั่วเหลืองจาก 8% เป็น 10% และ 12% ไม่มีผลต่อการเกิด syneresis และลักษณะเนื้อสัมผัสในด้านความแข็งของโยเกิร์ตถั่วเหลือง

การทำแห้งโยเกิร์ตถั่วเหลืองแบบ spray drying นั้นสภาวะที่ปริมาณของแข็งในโยเกิร์ตถั่วเหลือง 21% และ inlet temperature 110°C ให้โยเกิร์ตถั่วเหลืองผงที่มีคุณภาพดี คือ มีค่าการละลายและปริมาณเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มแลคติกอยู่ในระดับสูง และให้ปริมาณผลผลิตที่สูง

การศึกษาเปลี่ยนแปลงคุณภาพของโยเกิร์ตถั่วเหลืองผงในระหว่างการเก็บรักษานั้น พบว่าเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษานานขึ้น โยเกิร์ตถั่วเหลืองผงมีค่า TBARS และค่าสีเข้มเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณจุลินทรีย์และความสามารถในการละลายน้ำลดลง ส่วนผลของอุณหภูมิต่อคุณภาพของโยเกิร์ตถั่วเหลืองผง พบว่าการเก็บที่อุณหภูมิสูง โยเกิร์ตถั่วเหลืองผงมีค่า TBARS ต่ำกว่า และค่าสีเข้มกว่าที่อุณหภูมิต่ำ แต่จำนวนจุลินทรีย์ไม่แตกต่างกัน

#### การพัฒนาผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากถั่วเหลือง

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

การนำ PB 60-180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มาใช้ในการแปรรูปเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง ไม่ได้ส่งผลให้โครงสร้างของโปรตีนเกิดการเชื่อมโยงด้วยพันธะไดซัลไฟด์เพิ่มขึ้น จึงไม่ได้ทำให้เนื้อสัมผัสของเนื้อเทียม รวมทั้งลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางด้านการฉีกได้และความเปราะบางเพิ่มขึ้น จึงไม่ควรนำ PB มาใช้ในการผลิตเนื้อเทียมด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

การนำแป้งสาลีมาเป็นส่วนผสมของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง ทำให้เนื้อเทียมมีอัตราการขยายตัวและลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางด้านการฉีกได้ และความเปราะบางเพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้เนื้อเทียมที่มีส่วนผสมแป้งสาลี 20 เปอร์เซ็นต์ มีเนื้อสัมผัสที่แข็งแรงกว่าเนื้อเทียมที่มีส่วนผสมของแป้งสาลี 40 เปอร์เซ็นต์ จึงถือว่าปริมาณแป้งสาลี 20 เปอร์เซ็นต์เป็นระดับที่เหมาะสมต่อการนำมาเป็นส่วนผสมในวัตถุดิบสำหรับแปรรูปเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง

เมื่อศึกษาบทบาทของสารสกัด และกลูเตนสาลี ที่มีต่อการสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองที่เติมแป้งสาลี สามารถอธิบายได้ว่าสารสกัดมีส่วนช่วยปรับปรุงการสร้างเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมโปรตีนถั่วเหลือง โดยทำให้เนื้อเทียมมีอัตราการขยายตัวที่ดี และมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างที่มีลักษณะแบบเส้นใยของเนื้อเทียมเด่นชัดขึ้น ส่วนกลูเตนสาลีไม่ได้มีส่วนช่วยปรับปรุงลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางการฉีกได้ และความเป็นเส้นใยของเนื้อเทียมให้ดีขึ้น แต่มีผลต่อทางด้านความแข็งแรงของเนื้อเทียม

การใช้แป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มในวัตถุดิบสำหรับแปรรูปเนื้อเทียม พันธะเคมีที่สำคัญที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโครงสร้างโปรตีนในผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม คือ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก พันธะไฮโดรเจน และพันธะไดซัลไฟด์ การเติมแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเพิ่มขึ้นจาก 0 เปอร์เซ็นต์ เป็น 50 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณพันธะดังกล่าวในผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม เนื้อเทียมที่มีแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเป็นส่วนผสมในปริมาณ 0-20 เปอร์เซ็นต์ มีเนื้อสัมผัสที่แข็งแรง มีอัตราการขยายตัวสูง และมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างภายในแบบเส้นใยที่มีช่องรูพรุนตลอดโครงสร้าง จึงมีความสามารถในการกักเก็บน้ำสูง ในขณะที่เนื้อเทียมที่มีปริมาณแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มเพิ่มขึ้นถึง 50 เปอร์เซ็นต์ มีเนื้อสัมผัสที่เกาะตัวกันแน่น มีจำนวนช่องรูพรุนน้อย เนื้อเทียมไม่พองตัว จึงทำให้มีความเครียด ดัชนีความสมบูรณ์ของโครงสร้าง และความหนาแน่นจำเพาะเพิ่มขึ้น โดยเนื้อเทียมไม่ปรากฏลักษณะการจัดเรียงตัวแบบเส้นใย จึงทำให้มีลักษณะปรากฏทางเนื้อสัมผัสทางการฉีกและความเป็นเส้นใยต่ำ และเนื้อเทียมที่ได้มีสีเหลืองคล้ำมาก ดังนั้นปริมาณแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีไขมันประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ จึงจัดเป็นปริมาณแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มสูงสุดที่ทำให้เนื้อเทียมมีลักษณะทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ที่ดี และสามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมของวัตถุดิบในการแปรรูปเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลืองได้

ความชื้นในการแปรรูปเป็นตัวแทนที่มีบทบาทสำคัญต่อลักษณะทางกายภาพ และสมบัติเชิงหน้าที่ของเนื้อเทียมมากกว่าอุณหภูมิ และความเร็วรอบสกรู โดยเนื้อเทียมที่แปรรูปที่ความชื้นต่ำมีความแข็งแรงของเนื้อสัมผัส และความสามารถในการกักเก็บน้ำสูงกว่าเนื้อเทียมที่ผลิตที่ระดับความชื้นสูง และสถานะที่ทำให้ได้เนื้อเทียมที่มีโครงสร้างที่แข็งแรง สมบูรณ์ ทนต่อการหุงต้ม คือ ความชื้น 25 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที และ ความชื้น 30 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 250 / 350 รอบต่อนาที

## บรรณานุกรม

- กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. ศูนย์สารสนเทศการเกษตร. (2547). สถิติการค้าสินค้าเกษตรกรรมไทยกับต่างประเทศ ปี พ.ศ. 2546. เอกสารทางสถิติการเกษตร เล่มที่ 404. กรุงเทพมหานคร.
- กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2545). เอกสารวิชาการ การแปรรูปผลผลิตพืชไร่. จารุวรรณ ศิริพรรณพร, ปราโมทย์ ชรรมรัตน์, จูติภา มาลีหวล และ ดวงจันทร์ เฮงสวัสดิ์. (2543). การผลิตโยเกิร์ตจากกะทิ. อาหาร. 30(2): 87-97.
- นิธิยา รัตนาปนนท์. (2543). เคมีอาหาร. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. คณะอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่: เชียงใหม่.
- ประเสริฐ สายสิทธิ์ และคณะผู้ช่วยจากสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร. (2527). ถั่วเหลืองและการใช้ประโยชน์ในประเทศไทย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. สยามออฟเซ็ท: กรุงเทพมหานคร.
- วิจิตา จันทพรชัย, เพ็ญขวัญ ชมปรีดา และวิชัย หฤทัยธนาสันต์. (2537). การพัฒนาผลิตภัณฑ์จากโปรตีนถั่วลิสงแปลงเนื้อสัมผัส. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพมหานคร. (การประชุมวิชาการครั้งที่ 3, 3-5 กุมภาพันธ์ 2537).
- วราวุฒิ ครุส่ง และ รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. (2532). เทคโนโลยีการหมักในอุตสาหกรรมอาหาร. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ.
- เศรษฐศิลป์ อัมมวรรณ และภัทรภรณ์ ศรีสมรรถการ. (2541). การใช้โปรตีนจากถั่วเหลืองในการผลิตอาหารสุขภาพเลียนแบบเนื้อสัตว์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพมหานคร. (รายงานการประชุมเชิงวิชาการถั่วเหลืองแห่งชาติครั้งที่ 7, 25-27 ส.ค. 2541.)
- สมชาย ประภาวัต. (2532). ผลของความชื้นของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มและอุณหภูมิของเครื่องวิลเลจเทคเจอร์ไรเซอร์ต่อการทำเกษตรโปรตีน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพมหานคร. (การประชุมทางวิชาการของครั้งที่ 27, 30 มกราคม 2532)
- สมชาย ประภาวัต. 2534. การทำเนื้อเทียมจากถั่วเหลือง. อาหาร. 21: 161-171.
- อรอนงค์ กังสดาลอำไพ. (2543). อาหารเสริมสุขภาพ : ถั่วเหลือง. รายการวิทยุจุฬาฯ F.M. 101.5 MHz ใน [http://www.pharm.chula.ac.th/clinic101\\_5/article/Soy.html](http://www.pharm.chula.ac.th/clinic101_5/article/Soy.html)
- อภิพรรณ พุกภักดี. (2546). ถั่วเหลือง: พืชทองของไทย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพมหานคร.
- อานดี นิติธรรมยง และ ประไพศรี สิริจักรวาล. (2543). การฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการเรื่อง “นมถั่วเหลืองและผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม”. สถาบันวิจัยโภชนาการ. มหาวิทยาลัยมหิดล: กรุงเทพมหานคร.
- Andereson, J. J. B., Garner, S. C. (1997). Phytoestrogens and human function. Nutr. Today. 32, 232-239.

- Atkinson, W.T. (1970). Meat-like protein food product. U.S. Patent. 3,488,770.
- Badrie, N. and Mellows, W.A. (1992). Soybean flour/oil and wheat bran effects on characteristics of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) flour extrudate. J. Food Sci. 57(1): 108-111.
- Barnes, S., Kirk, M. and Coward, L. (1994). Isoflavones and their conjugates in soy food: extraction conditions and analysis by HPLC-Mass Spectrometry. J. Agric. Food Chem. 42, 2466-2474.
- Beck, V., Unterrieder, E., Krenn, L., Kubelka, W. and Jungbauer, A. (2003). Comparison of hormonal activity (estrogen, androgen and progestin) of standardized plant extracts for large scale use in hormone replacement therapy. The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology. 84, 259-268.
- 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.
- 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.
- Brouns, F. (2002). Soya isoflavone: a new and promising ingredient for the health foods sector. Food Res. Int. 35, 187-193.
- Buono, M. A., Setser, C., Erickson, L. E. and Fung, D.Y.C. (1990). Soymilk yogurt: sensory evaluation and chemical measurement. J. Food Sci. 55: 528-531.
- 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.
- Carrao-Panizzi, M. C., Favoni, S. P. G. And Kikuchi, A. (2002). Extraction time for soybean isoflavone determination. Brazilian Archives of Biology and Technology. 45, 515-518.
- 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*. 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.
- Chang, Y. C. and Nair, M.G. (1995). Metabolism of daidzein and genistein by internal bacteria. Journal of Natural Products. 58, 1892-1896.

- 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.
- Cheng, Y. J., Thomson, L. D. and Brittin, H. C. (1990). Sogurt, a yoghurt-like soybean product: development and properties J. Food Sci. 55: 1178-1179.
- Conway, H.F. and Anderson, R.A. (1973). Protein-fortilized extruded food products. Cereal Sci Today. 18(4): 94-97.
- Coward, L., Barnes, N., Setchell, K. D. R. and Barnes, S. (1993). Genistein and daizein, and their  $\beta$ -glycoside conjugates: anti-tumor isoflavones in soybean foods from American and Asian diets. J. Agric. Food Chem. 41, 1961-1967.
- 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.
- 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.
- Dello, S. M., Bertora, N., Martino, M. and Bavalacqua, Y. A. (2004). Influence of dietary fiber addition on sensory and rheological properties of yoghurt. Int. Dairy J. 14:263-268.
- 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.
- Fukutake, M., takahashi, M., Ishida, K., Kawamaru, H., Sugimura, T. and Wakabayashi, K. (1996). Quantification of genistein and genistin in soybeans and soybean products. Food and Chemical Toxicology. 34, 457-461.
- Grun, I. U., Adhikari, K., Li, C., Li, Y., Lin, B., Zhang, J. and Fernando, L. N. (2001). Change in the profile of genistein, daiazin, and their conjugates during thermal processing of tofu. J. Agric. Food Chem. 49, 2839-2843.
- 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.
- 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.



- 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.
- 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.
- Hager, D.F. (1984). Effects of extrusion upon soy concentrate solubility. J. Agric. Food Chem. 32: 293-296.
- 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.
- 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. Texture Studies. 9: 33-58.
- Ho, and M.V. Karwe (eds.), Food extrusion science and technology. pp. 693-709. Marcel Dekker: New York, USA.
- 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.
- Hou, J. W., Yu, R. C. and Chou, C. C. (2000). Changes in some components of soymilk during fermentation with bifidobacteria. Food Res. Int. 33: 393-397.
- Hutabarat, L. S., Greenfield, H. and Mulholland, M. (2001). Isoflavones and coumestrol in soybeans and soybean products from Australia and Indonesia. Journal of Food Composition and Analysis. 14, 43-58.
- 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.

- 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.
- Kudou, S., Fleury, Y., Welti, D., Magnolato, D., Uchida, T., Kitamura, K. and Okubo, K. (1991). Malonyl isoflavone glycosides in soybean seeds. Agricultural biological Chemistry. 55, 2227-2233.
- 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. (1996b). Effect of cysteine on the functional properties and microstructure of wheat flour extrudates. J. 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. 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. 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.
- 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., Li, J., Schwenk, M, Singletary, K., Faller, J. (1999). Stability of isoflavones during extrusion processing of corn/soy mixtures. J. 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.
- Messina, M., Persky, V., Setchell, K. (1994). Soy intake and cancer risk: A review of the In Vitro and In Vivo data. Nutrient Cancer. 21, 113-131.
- Mistry, V.V. and Pulgar, J. B. (1996). Physical and storage properties of high milk protein powder. Int. Dairy J. 6:195-203.
- 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, 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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. Food Eng. Article in press.
- Pongsawatmanit, R. and Suklampoo, L. (nd). Soy yoghurt quality from various preparation processes. Department of Agro-Industry, Kingmongkut's Institute of Technology Ladkrabang. 225-229.
- 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. Food Sci. 58(2): 378-381.
- Pyo, Y. H., Lee, T. C., Lee, Y. C. (2004). Enrichment of bioactive isoflavones in soymilk fermented with  $\beta$ -glucosidase-producing lactic acid bacteria. Food Res. Int. Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).
- 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.
- 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.
- Singh, N. and Smith, A.C. (1997). A comparison of wheat starch, whole wheat meal and oat flour in extrusion cooking process. J. Food Eng. 34: 15-32.
- 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.
- Swanson, M., Stoll, M., Schapaugh, W. and Takemoto, L. (2004). Isoflavone content of Kansas soybeans. American Journal of Undergraduate Research. 2, 27-32.
- Tanteerarm, K. (1993). Soybean processing for food uses. College of Agriculture. University of Illinois at Urbana-Champaign. Illinois, USA.
- Tolstoguzov, V. B. (1993). Thermoplastic extrusion-the mechanism of the formation of extrudate structure and properties. JAOCs. 70(4): 417-424.
- Tolstoguzov, V.B., Grinberg, V.Y. and Gurov, A. N. (1985). Some physicochemical approaches to the problem of protein texturization. J. Agric. Food Chem. 32(2): 151-159.
- Tsangalis, D. and Shah, N. P. (2004). Metabolism of oligosaccharides and aldehydes and production of organic acids in soymilk by probiotic bifidobacteria. Int. J. Food Sci. Tech. 39: 541-554
- Wang, Y. C., Yu, R. C., Yang, H. Y. and Chou, C. C. (2003). Sugar and acid contents in soymilk fermented with lactic acid bacteria alone or stimutaneously bifidobacteria. Food Micro. 20:333-338.
- 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.
- Wu, J. (1994) Isoflavone content in isolated soy protein products. MS Thesis, University of Illinois, Urbana, IL.
- Yuryev, V.P., Zasyupkin, 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.

## ประวัติผู้วิจัย

### นางสุนันทา ทองทา

นางสุนันทา ทองทา เกิดเมื่อวันที่ 27 ตุลาคม 2506 ณ จังหวัดนครราชสีมา ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ สังกัดสาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วท.บ. (พัฒนาผลิตภัณฑ์) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2529 จบการศึกษาระดับปริญญาโท วท.ม. (วิทยาศาสตร์การอาหาร) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2533 จากนั้นเข้ารับราชการบรรจุตำแหน่งอาจารย์ที่ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีเดียวกัน ต่อมาในปี พ.ศ. 2536 ได้รับทุน Fulbright จากมูลนิธิการศึกษาไทย-อเมริกัน ไปศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก ที่ University Of Illinois at Urbana-Champaign สหรัฐอเมริกา และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2541

นางสุนันทา ทองทา ได้มีผลงานทางวิชาการดังต่อไปนี้

สุนันทา ทองทา และ วรวิมลยา เกียรติพงษ์ลาภ. 2549. การผลิตแป้งทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์.

รายงานวิจัยทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (หัวหน้าโครงการ)

สุนันทา ทองทา และ กล้าณรงค์ ศรีรอด. 2549. ผลของอุณหภูมิ ปริมาณน้ำ และการเปลี่ยนสมบัติทางกายภาพต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งมันสำปะหลัง. รายงานวิจัยทบวงมหาวิทยาลัย และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. (หัวหน้าโครงการ)

ขจิรัตน์ ระรื่นรัมย์, สุนันทา ทองทา, และ จิรวัดน์ ยงสวัสดิกุล. ลักษณะทางโครงสร้างและเนื้อสัมผัสของเนื้อเทียมจากโปรตีนถั่วเหลือง. การประชุมวิชาการอุตสาหกรรมอุตสาหกรรมเกษตร ครั้งที่ 6. 28-29 พฤษภาคม 2547. CD-ROM. นครปฐม: คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ปทุมพร โสถิรัตน์พันธุ์, และ สุนันทา ทองทา. 2546. การเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวต่อลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์. วารสารเทคโนโลยีสุรนารี. 10(3):220-229.

สุนันทา ทองทา และ มาโนชญ์ สุธีพัฒนานนท์. 2546. ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเอ็กซ์ทรูชันของข้าวกล้อง. รายงานผลการวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. (หัวหน้าโครงการ)

สิงหนาท พวงจันทร์แดง, วิเชียร วรพุทธพร, สุนันทา ทองทา, เกษม นันทชัย, และวีระ สุวรรณสร. 2545. คุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวจากธัญพืชต่างๆ ที่ผลิตด้วยเครื่องอัดพอง. รายงานผลการวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สุนันทา ทองทา และ วีระ สุวรรณสร. 2543. ผลของตัวแปรของกระบวนการอัดพองที่มีต่อผลิตภัณฑ์พองตัวโดยใช้เครื่องอัดพองแบบสกรูเดี่ยว. รายงานผลการวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น. (หัวหน้าโครงการ)

- Tongta, S., Kiatpongarp, W. and K. Sriroth, K. 2004. Effect of aging temperature on retrogradation of concentrated cassava starch gel. In 'Starch: Progress in Structural Studies, Modifications and Applicatins' Tomasik, P., Yuryev, V.P. and Bertoft, E. (eds.). Polish Society of Food Technologists' Małopolska Branch, Kraków, Poland.
- Nantachai, K. Srijesdaruk, V., Wiriyaiprom, S. and Tungwongchai, R. 1997. Sensory perceptions of sugarcane juices. *Knongkaen University Research Journal*. 2(1):10-17.
- Wiriyaiprom, S., Wei, L.S. and Padua, G.W. 1996. Effect of soy protein isolates on physical characteristics of extruded expanded half-products. A presentation In Annual IFT Meeting. June 26, 1996. New Orleans, USA
- Wiriyaiprom, S., Padua, G.W. and Wei, L.S. 1996. Effect of extrusion parameters on physical properties of half-products fortified with soy protein. A presentation In Annual IFT Meeting. June 15, 1997. Orlando, USA

สถานที่ติดต่อ: สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร สำนักเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ (044) 22-4266 โทรสาร (044) 22-4150