รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การศึกษาองค์ประกอบ โครงสร้าง และสมบัติของแป้งและสตาร์ชจากถั่วหรั่ง เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม

(Evaluation of component, structure and properties of flour and starch from bambarra groundnut approaching to develop value-added products)

ผู้วิจัย

ดร. ปิยรัตน์ ศิริวงศ์ไพศาล
ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่
อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

สนับสนุนโครงการวิจัย โดยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

บทคัดย่อ

จากการศึกษาโครงสร้างและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ช (starch) และแป้ง (flour) จากถั่วหรั่ง (*Voandzeia Subterranea*) พบว่าแป้งถั่วหรั่งประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เถ้า และ เยื่อใย ร้อยละ 58.38 15.48 7.90 4.16 และ 2.54 ตามลำดับ สำหรับสตาร์ชถั่วหรั่งที่ได้จากการสกัดด้วยสารละลายด่างนั้น พบว่ามีองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตสูงถึงร้อยละ 88.98 แต่มีโปรตีน ไขมัน เถ้า และเยื่อใย ในปริมาณต่ำซึ่งเท่ากับร้อยละ 0.61 0.44 0.47 0.60 ตามลำดับ นอกจากนั้นพบว่าสตาร์ชถั่วหรั่งมีปริมาณอะมิโลสร้อยละ 21.67 รูปร่างเม็ดสตาร์ชเป็นทั้งแบบวงรีและแบบทรงกลม โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 31.11 ไมโครเมตร และมีโครงสร้างผลึกของเป็นแบบเอ (A-type) โดยมีปริมาณผลึกร้อยละ 43.69 จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของสตาร์ช ถั่วหรั่งด้วยเครื่อง DSC พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลาติไนเซชัน (T_o) เท่ากับ 71.69 ^{o}C และค่าเอนทัลปี (ΔH) เท่ากับ 11.73 จูลต่อกรัม และพบว่าสตาร์ชถั่วหรั่งมีความสามารถในการดูดซับน้ำและน้ำมันเท่ากับ 1.67 และ1.01 มล./กรัม ตามลำดับ สตาร์ชถั่วหรั่งมีรูปแบบการพองตัวเป็นแบบสองขั้น ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการพองตัวค่อนข้างต่ำ จากการศึกษาสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชเพสท์ (starch paste) พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดความหนืด ค่า breakdown และค่า setback เท่ากับ 77.7 ^{o}C 170 BU 220 BU ตามลำดับ และพบว่าสตาร์ชเพสท์มีความคงทนต่อกรดในช่วง pH 4.6 ถึง 7.0 จากการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชและแป้งจาก ถั่วหรั่ง พบว่าสตาร์ชถั่วหรั่งมีค่ากำลังการพองตัว ค่า breakdown และsetback ที่สูงกว่า แต่มีค่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน อุณหภูมิเริ่มต้นเกิดความหนืด และค่าความสามารถในการดูดซับน้ำและน้ำมันที่ต่ำกว่า จากการศึกษาพฤติกรรมการไหล พบว่าสตาร์ชเพสท์ที่ทุกระดับความเข้มข้นแสดงพฤติกรรมการไหลแบบเชียร์ทินนิ่ง (shear thinning) เมื่อความเข้มข้นของสตาร์ชเพิ่มสูงขึ้นพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว (k) มีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล (n) มีแนวโน้มลดลง ซึ่งแสดงว่าสตาร์ชเพสท์แสดงพฤติกรรมการไหลแบบเชียร์ทินนิ่งเพิ่มมากขึ้น นอกจากนั้นพบว่าค่า G' ของเจลสตาร์ชถั่วหรั่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสตาร์ชเพิ่มขึ้น และพบว่าค่า G' ของเจลสตาร์ชที่เติมน้ำตาลมอลโทส มีค่าสูงกว่าของเจลสตาร์ชถั่วหรั่งที่ไม่เติมน้ำตาล และเจลสตาร์ชถั่วหรั่งที่เติมน้ำตาลแลกโทสหรือน้ำตาลซูโครส การสูญเสียน้ำจากการแช่เยือกแข็งและการละลาย (จำนวน 5 รอบ)ของเจลสตาร์ชถั่วหรั่งเท่ากับร้อยละ6.54 การเติมน้ำตาลซูโครส น้ำตาลแลคโตส หรือน้ำตาลมอลโตส ส่งผลให้ร้อยละการสูญเสียน้ำของเจลสตาร์ชถั่วหรั่งมีค่าลดลงเป็น 6.17 6.04 และ 5.0 ตามลำดับ การเก็บรักษาเจลสตาร์ชถั่วหรั่งที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 ชั่วโมง ส่งผลให้ปริมาณโมเลกุลที่จัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ (short-range molecular order) มีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงถึงเจลสตาร์ชถั่วหรั่งสามารถเกิดรีโทรเกรเดชันได้เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่าการเติมน้ำตาลมอลโทสช่วยทำให้เจลสตาร์ชถั่วหรั่งเกิดรีโทรเกรเดชันได้น้อยลง สำหรับรูปแบบของการถูกย่อยด้วยกรดและเอ็นไซม์ของสตาร์ชถั่วหรั่ง พบว่าเป็นแบบ 2 ขั้นตอน (biphasic) โดยสตาร์ชถั่วหรั่งสามารถถูกย่อยอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาเริ่มต้น จากนั้นอัตราการย่อยดำเนินไปอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่ภาวะสมดุลที่ระดับการถูกย่อยด้วยกรดและเอ็นไซม์ร้อยละ 24.11 และ 16.21 ตามลำดับ

Abstract

Structure and functional properties of starch and flour from Bambarra groundnut (*Voandzeia Subterranea*) were investigated. The bambarra groundnut flour contained 58.38% of carbohydrate, 15.48 % of protein, 7.90% of fat, 4.19% of ash and 2.54% of fiber content. The bambarra groundnut starch isolated by the alkaline method had high content of carbohydrate (88.98%) and low content of protein (0.61%), fat (0.44%) ash (0.47%) and fiber (0.60%). Amylose content of bambarra groundnut starch was 21.67%. The starch granule shape appeared to be oval and round having an average diameter of 31.11 μm. X-ray diffraction pattern of the starch granules revealed an A-type with 43.69% of crystallinity. Thermal transition temperature of the starch assessed by DSC was 71.69°C at onset (T_o) and gelatinisation enthalphy (ΔH) was 11.73 J/g. The water and oil absorption capacity of bambarra groundnut starch were 1.67 and 1.01 ml/g, respectively. Bambarra groundnut starch showed a two stage swelling pattern indicating a fairly restricted swelling starch. The pasting properties of the starch showed pasting temperature, breakdown and setback of 77.7°C, 170 BU, 220 BU, respectively. The starch paste showed good resistance to acid at pH range 4.6 to 7.0. Compared with bambarra groundnut flour, the starch exhibited higher swelling power, breakdown and setback, but lower gelatinisation temperature, pasting temperature, water and oil absorption capacity. From flow behavior test, starch pastes differing concentration showed a shear thinning behavior. The consistency coefficient (k) of bambarra groundnut starch increased with increasing concentration, while the flow behavior index (n) exhibited the opposite trend denoting more shear thinning behavior. The storage modulus (G') of starch gels increased with increasing starch concentration. Starch gel added maltose showed higher G' than that of native starch gel and starch gel added lactose or sucrose. The syneresis of bambarra groundnut starch gel was 6.54% for five freeze-thaw cycles. When sucrose, lactose or maltose was added, syneresis of the starch gel was reduced to 6.17, 6.04 or 5.0 %, respectively. There was high retrogradation occur for native starch gel, the short-range molecular order (absorbance peak at 1047 cm^{-1}) increased during storage at 4°C for 50 hours. However, the retrogradation of native starch gel was decreased by adding maltose. The acid and enzyme hydrolysis in bambarra groundnut starch exhibited a biphasic pattern, a relatively rapid rate at the initial stage followed by a progressively decreased rate thereafter. The bambarra groungnut starch showed a plateau at 24.11% acid hydrolysis and at 16.21% enzyme hydrolysis.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
สารบัญตาราง	ง
สารบัญภาพ	จ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ตรวจเอกสาร	2
2.1 ถั่วหรั่ง	3
2.2 แป้งและสตาร์ชจากถั่วหรั่ง	7
2.3 น้ำตาลไดแซคคาไรด์	11
บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	15
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	
4.1 การผลิตแป้งและสตาร์ชจากถั่วหรั่ง	20
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งและสตาร์ชจากถั่วหรั่ง	22
4.3 สมบัติทางโครงสร้างของสตาร์ชถั่วหรั่ง	
4.3.1 รูปร่าง ขนาด และการกระจายตัวของขนาดของเม็ดสตาร์ชถั่วหรั่ง	24
4.3.2 ลักษณะโครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วหรั่ง	25
4.4 สมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งและสตาร์ชจากถั่วหรั่ง	
4.4.1 ความสามารถในการดูดซับน้ำและน้ำมันของแป้งและสตาร์ชจากถั่วหรั่ง	26
4.4.2 ความสามารถในการละลายของโปรตีนของแป้งถั่วหรั่ง	27
4.4.3 กำลังการพองตัวของสตาร์ชและแป้งจากถั่วหรั่ง	27
4.4.4 การเกิดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ชและแป้งถั่วหรั่ง	28
4.4.5 สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชและแป้งถั่วหรั่ง	29
4.4.6 สมบัติวิสโคอีลาสติกของสตาร์ชถั่วหรั่ง	33
4.4.7 สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชถั่วหรั่ง	36
4.4.8 ความสามารถในการถูกย่อยด้วยกรดของสตาร์ชถั่วหรั่ง	39
4.4.9 ความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอ็นไซม์ของสตาร์ชถั่วหรั่ง	39
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	42
บทที่ 6 เอกสารอ้างอิง	44

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของถั่วหรั่งสดและแห้ง	5
ตารางที่ 2.2 ชนิดและปริมาณกรดอะมิโนในถั่วหรั่งแห้ง	5
ตารางที่ 2.3 ปริมาณองค์ประกอบของกรดไขมันในถั่วหรั่งแห้ง	6
ตารางที่ 2.4 ปริมาณวิตามินในถั่วหรั่งแห้ง 100 กรัม	6
ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งถั่วหรั่ง	7
ตารางที่ 2.6 ชนิดโครงสร้าง แหล่งที่พบ และหน้าที่ของน้ำตาลไดแซคคาไรด์	12
ตารางที่ 4.1 ปริมาณผลผลิตในแต่ละขั้นตอนการผลิตแป้งถั่วหรั่ง	20
ตารางที่ 4.2 ปริมาณผลผลิตในแต่ละขั้นตอนการผลิตสตาร์ชถั่วหรั่ง	22
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งและสตาร์ชจากถั่วหรั่ง	23
ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์การเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชและแป้งจากถั่วหรั่ง	29
ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ทางความหนืดของสตาร์ชและแป้งจากถั่วหรั่งที่ pH ต่าง ๆ	31

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 ขั้นตอนการผลิตสตาร์ชจากถั่วหรั่ง 8

ภาพที่ 2.2 สูตรโครงสร้างของน้ำตาลไดแซคคาไรด์ (ก) น้ำตาลแลคโทส (ข) น้ำตาลซูโครส (ค) น้ำตาลมอลโทส 13

ภาพที่ 4.1 ลักษณะปรากฏของถั่วหรั่งและแป้งถั่วหรั่งที่ผ่านขั้นตอนการผลิตต่าง ๆ 21

ภาพที่ 4.2 ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชถั่วหรั่ง ที่ทำการตรวจวัดด้วย Scanning electron micrographs (SEM) ที่กำลังขยาย 2000 24

ภาพที่ 4.3 ขนาดและการกระจายตัวของขนาดเม็ดสตาร์ชถั่วหรั่ง 25

ภาพที่ 4.4 รูปแบบการหักเหรังสีเอ็กซเรย์ของสตาร์ชถั่วหรั่ง 25

ภาพที่ 4.5 ความสามารถในการดูดซับน้ำและน้ำมันของแป้งและสตาร์ชจากถั่วหรั่ง 27

ภาพที่ 4.6 กำลังการพองตัวของสตาร์ชและแป้งจากถั่วหรั่งที่อุณหภูมิต่างๆ 28

ภาพที่ 4.7 เทอร์โมแกรมการเกิดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ชและแป้งจากถั่วหรั่ง 29

ภาพที่ 4.8 ลักษณะกราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชและแป้งจากถั่วหรั่งที่ pH 7.0 30

ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของค่าความหนืดปรากฏกับอัตราการเฉือนของสตาร์ชถั่วหรั่ง ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ทำการวัดด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ ที่อุณหภูมิ 60 °C ที่ช่วงอัตราการเฉือน 20-400 s^{-1} 32

ภาพที่ 4.10 อิทธิพลของความเข้มข้นต่อดัชนีพฤติกรรมการไหล (flow behavior index) และสัมประสิทธิ์ความคงตัว (consistency coefficient) ของสตาร์ชถั่วหรั่ง ซึ่งทำการศึกษาด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ ที่อุณหภูมิ 60 °C และอัตราการเฉือน 20-400 s^{-1} 33

ภาพที่ 4.11 ผลของความถี่ต่อค่า G' (a), G'' (b) และ tanδ (c) ของสตาร์ชถั่วหรั่งที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ซึ่งทำการศึกษาด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ ที่อุณหภูมิ 60 °C และความถี่ 1-100 Hz 35

ภาพที่ 4.12 ผลของความถี่ต่อค่า G' ของสตาร์ชถั่วหรั่งความเข้มข้นร้อยละ 6 (native starch) และสตาร์ชถั่วหรั่งที่เติมน้ำตาลมอลโตส (starch+maltose) น้ำตาลแลกโตส (starch+lactose) และน้ำตาลซูโครส (starch+sucrose) ซึ่งทำการศึกษาด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ที่อุณหภูมิ 60 °C และความถี่ 1-100 Hz 36

ภาพที่ 4.13 ร้อยละการสูญเสียน้ำ (% syneresis) ของเจลสตาร์ชถั่วหรั่งที่เติมน้ำตาลมอลโตส (maltose) น้ำตาลแลกโตส (lactose) และน้ำตาลซูโครส (sucrose) และเจลสตาร์ชที่ไม่เติมน้ำตาล (native starch) 37

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.14 ลักษณะกราฟการดูดกลืนแสงที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR ของเจลสตาร์ช 38
ถั่วหรั่งที่เติมน้ำตาลมอลโตส (a) น้ำตาลแลกโตส (b) และน้ำตาลซูโครส
(c) และเจลสตาร์ชถั่วหรั่งที่ไม่เติมน้ำตาล (d) ที่ระยะเวลาในการเก็บรักษาต่าง ๆ

ภาพที่ 4.15 ความสามารถในการถูกย่อยด้วยกรด (ไฮโดรคลอลิก 2.2 โมล) ของสตาร์ชถั่วหรั่ง 40

ภาพที่ 4.16 ลักษณะปรากฏของเม็ดสตาร์ชถั่วหรั่งก่อนถูกย่อย (a) และหลังจากถูกย่อยด้วยกรด 40
(ไฮโดรคลอลิก 2.2 โมล) เป็นเวลา 2 วัน (b) 4 วัน (c) และ 6 วัน (d) โดยทำการ
ตรวจวัดด้วยเครื่อง Scanning electron micrographs (SEM)

ภาพที่ 4.17 ความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอ็นไซม์อะมิเลส (porcine pancreatic α-amylase) 41
ของสตาร์ชถั่วหรั่ง

ภาพที่ 4.18 ลักษณะปรากฏของเม็ดสตาร์ชถั่วหรั่งหลังจากถูกย่อยด้วยเอ็นไซม์อะมิเลส 41
(porcine pancreatic α-amylase) เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (a) 23 ชั่วโมง (b) 28 ชั่วโมง (c)
และ 51 ชั่วโมง (d) โดยทำการตรวจวัดด้วยเครื่อง Scanning electron micrographs (SEM)

บทที่ 1
บทนำ

ถั่วหรั่ง (Bambara groundnut) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Voandzeia subterranea* เป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดในเขตร้อนชื้นของทวีปแอฟริกา และมีการกระจายพันธุ์ออกไปยังทวีปอเมริกาใต้ อเมริกากลาง ทางตอนเหนือของออสเตรเลีย และทวีปเอเชีย โดยผ่านเข้าทางฟิลิปปินส์ อินโดนีเซีย เข้าสู่มาเลเซีย และชายแดนภาคใต้ของประเทศไทย (Duke และคณะ, 1986) ต่อมาเป็นพืชผลผลิตที่สำคัญในท้องถิ่นภาคใต้ โดยจังหวัดที่มีการปลูกมากได้แก่ จังหวัดสงขลา พัทลุง ปัตตานี นครศรีธรรมราช สุราษฎร์ธานี และจังหวัดนราธิวาส ส่วนใหญ่ใช้บริโภคภายในท้องถิ่น ที่เหลือจะส่งไปขายในประเทศมาเลเซีย เกษตรกรนิยมปลูกถั่วหรั่งบนที่ราบหรือปลูกเป็นพืชแซมในไร่โดยเป็นพืชที่สามารถปรับตัวต่อสภาพแห้งแล้งได้ดีกว่าพืชชนิดอื่นและสามารถปลูกได้ตลอดทั้งปี เป็นพืชที่ต้านทานโรคและแมลงเป็นอย่างดี และสามารถปลูกเป็นพืชหมุนเวียนกับพืชอื่น ๆ ได้ เช่นยางพารา อ้อย และพืชไร่ทั่วไป เพราะมันสามารถจะมีส่วนช่วยให้ไนโตรเจนในดินเป็นประโยชน์ต่อพืชซึ่งจะปลูกตามภายหลังได้โดยทั่วไปจะนำเมล็ดอ่อนของถั่วหรั่งมารับประทาน โดยทำให้สุกโดยการต้มหรือย่างก่อนรับประทาน หรือนำมาใช้ประกอบอาหารอื่นๆ เช่น ทำไส้ขนม, แกง เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถนำเมล็ดแก่ของถั่วหรั่งมาบดทำเป็นแป้งได้ และมีการนำถั่วหรั่งมาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการแปรรูปในอุตสาหกรรมอาหาร โดยในประเทศรัสเซียและกานาได้นำถั่วหรั่งมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์บรรจุกระป๋อง จำหน่ายเป็นสินค้าที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศ (กิตติ เจิดรังษี, 2530)

ถั่วหรั่งเป็นพืชมีคุณค่าทางอาหารสูงโดยมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก (ส่วนใหญ่เป็นสตาร์ช) มีปริมาณไขมันในระดับต่ำ และมีโปรตีนที่มีคุณภาพสูงจึงเป็นแหล่งของสารอาหารที่มีความสมดุลย์ดีมาก (Purseglove, 1977) โดยโปรตีนในถั่วหรั่งมีองค์ประกอบของกรดอะมิโนที่จำเป็นได้แก่ ไลซีน และเมทไธโอนีน สูงกว่าที่พบในเมล็ดพืชตระกูลอื่น ๆ (NAS, 1979)และไม่พบการปนเปื้นจากอะฟลาท็อกซินจึงเป็นพืชที่มีความปลอดภัยต่อการบริโภค (ชุติมันต์ และคณะ, 2537) นอกจากนี้จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าคาร์โบไฮเดรตในเมล็ดถั่วเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดที่มีการปล่อยตัวออกมาอย่างช้า ๆ (slow release carbohydrate) และพบว่า สตาร์ชจากถั่วมีคุณสมบัติทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (resistant starch) โดยสามารถทนได้สูงกว่าสตาร์ชจากธัญพืชมาก (Madhusudhan และ Tharanathan, 1995a, 1995b และ 1996) จึงกล่าวได้ว่าสตาร์ชจากถั่วมีปริมาณขององค์ประกอบที่เทียบเท่ากับเส้นใยอาหารที่มากกว่า และจากคุณสมบัติดังกล่าวของถั่วส่งผลให้เมื่อมีการบริโภคถั่วเป็นประจำสามารถช่วยป้องกันโรคเบาหวาน โรคหลอดเลือดหัวใจ และโรคมะเร็งในลำไส้ใหญ่ได้ (Simpson และคณะ, 1981; และ Soni และคณะ 1982) ในอนาคตผลิตผลประเภทถั่วจะเป็นแหล่งการผลิตสตาร์ชที่สำคัญ เพราะในเมล็ดถั่วจะมีองค์ประกอบของสตาร์ชโดยประมาณสูงถึง 50% และพบว่าโครงสร้างของ

สตาร์ชถั่วยังมีความแตกต่างจากสตาร์ชที่สกัดได้จากธัญพืชและพืชจำพวกพืชหัวต่างๆ คือมีค่าของการละลายและการพองตัวที่สูงกว่า และเมื่อนำมาผ่านการให้ความร้อนและทำให้เย็นแล้วสารละลายสตาร์ชถั่วยังคงมีความหนืดสูงอยู่ และความหนืดจะคงตัวเมื่อเก็บสารละลายไว้ที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้สตาร์ชที่สกัดได้จากถั่วยังมีความหลากหลายทางพันธุกรรมมากพอ ๆ กับสตาร์ชที่สกัดจากข้าวโพด (กล้าณรงค์และเกื้อกูล, 2543)

จากงานวิจัยข้างต้นพบว่าคาร์โบไฮเดรตและสตาร์ชจากถั่วมีคุณสมบัติที่พิเศษเฉพาะตัวและมีประโยชน์ต่อร่างกายสูง ดังนั้นจึงมีความน่าสนใจที่จะนำถั่วหรั่งซึ่งเป็นหนึ่งในพืชตระกูลถั่วที่มีศักยภาพในการปลูกทางภาคใต้ไปผลิตเป็นแป้งและสตาร์ชเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ แต่เนื่องจากข้อมูลงานวิจัยพื้นฐานด้านองค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางโครงสร้าง และคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งและสตาร์ชจากถั่วหรั่งมีอยู่ค่อนข้างน้อยจึงทำให้การวิจัยและพัฒนามีขีดจำกัด ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงเป็นการศึกษาเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สามารถจะทำให้เชื่อมโยงกับการใช้ประโยชน์สำหรับเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่มจากแป้งและสตาร์ชจากถั่วหรั่งอย่างมีระบบและมีประสิทธิภาพต่อไป อีกทั้งยังเป็นการดำเนินงานตามนโยบายเศรษฐกิจแบบพอเพียงในการใช้ประโยชน์จากวัตถุดิบที่มีในท้องถิ่นให้มีมูลค่าเพิ่มเพื่อจะช่วยให้เกษตรกรในท้องถิ่นมีรายได้เพิ่มมากขึ้น และนอกจากนั้นการทำวิจัยนี้ยังจะสามารถใช้เป็นแนวทางในการวิจัยและพัฒนาการใช้ประโยชน์จากผลิตผลประเภทถั่วอื่น ๆ ได้อีกด้วย

บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

2.1 ถั่วหรั่ง

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ถั่วหรั่งเป็นพืชตระกูลถั่วล้มลุก มีระบบรากแก้ว ประกอบด้วยลำต้น 2 ชนิด คือ แบบตั้งตรง และเลื้อยขนานไปกับพื้นดิน บนข้อของลำต้นเลื้อยเป็นที่เกิดของใบ รากวิสามัญ รวมทั้งดอกและฝักถั่วหรั่ง ใบเป็นใบประกอบ ก้านใบ สีเหลือง ฝักและเมล็ดเกิดบริเวณที่เคยเป็นที่อยู่ของดอก มีรูปร่างกลมรีเล็กน้อย เปลือกผลชั้นนอกเชื่อมติดกับ ชั้นกลาง ส่วนเปลือกชั้นในแยกออกต่างหาก เมล็ดภายในมีหลายสี ขึ้นอยู่กับพันธุ์ เช่น ครีม น้ำตาล แดง ม่วง ดำ หรือ แดงลาย ขนาดเมล็ด 1.0 x 0.8 เซนติเมตร ความหนาและเหนียวของเปลือกหุ้มเมล็ด (seed coat) ขึ้นอยู่กับพันธุ์เช่นกัน

2.1.2 แหล่งเพาะปลูกที่เหมาสม

แหล่งเพาะปลูก สามารถปลูกได้ในพื้นที่ของหลายจังหวัดของภาคใต้ เช่น สงขลา นราธิวาส ยะลา กระบี่ ตรัง พัทลุง นครศรีธรรมราช สุราษฎร์ธานี สภาพพื้นที่ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลเล็กน้อยถึงความสูง 1520 เมตร เหนือระดับน้ำทะเล

ลักษณะดิน ดินที่ใช้เพาะปลูกเป็นดินดอนที่มีการระบายน้ำและระบายอากาศในดินดี ในพื้นที่ดอน เช่น ดินทราย ทรายร่วน ดินร่วนปนทราย ถั่วหรั่งเป็นพืชทนดินกรด ไม่ทนดินด่าง และดินเค็มในระดับ pH 5.0-6.5 เป็นระดับที่เหมาะสม

สภาพภูมิอากาศ เป็นพืชที่ต้องการอุณหภูมิสูง โดยอุณหภูมิเฉลี่ยกลางวัน-กลางคืน ประมาณ 20 - 28 องศาเซลเซียส ควรมีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 600 - 750 มิลลิเมตร และจะให้ผลผลิตสูงขึ้นถ้ามีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 900 - 1,200 มิลลิเมตร

แหล่งน้ำ ถั่วหรั่งต้องการน้ำในช่วงระยะเริ่มปลูกจนถึงระยะออกดอก หากมีปริมาณฝนตกอย่างสม่ำเสมอในช่วงดังกล่าว จะทำให้มีการเจริญเติบโตดี และให้ผลผลิตสูงขึ้นมาก ถั่วหรั่งสามารถทนต่อสภาพแห้งแล้งได้ดี

2.1.3 พันธุ์

พันธุ์สงขลา 1 อายุเก็บเกี่ยวสั้น 110 - 120 วัน ระยะดอกเริ่มบานเมื่ออายุประมาณ 38 วัน เมล็ดมีน้ำหนัก 48.3 กรัม เมล็ดภายในสีแดง เป็นที่นิยมของผู้บริโภคค่อนข้างมีความทนทานต่อโรคใบไหม้ ขึ้นอยู่กับสภาพพื้นที่ พันธุ์พื้นเมือง อายุเก็บเกี่ยวยาวกว่า 150 - 180 วัน ระยะดอกแรกเริ่มบานเมื่ออายุประมาณ 52 วันเมล็ดมีน้ำหนัก 36.9 กรัม เมล็ดภายในสีเหลืองครีมค่อนข้างอ่อนแอต่อโรคใบไหม้

2.1.4 การเก็บเกี่ยว

ระยะเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม พันธุ์สงขลา 1 ระยะเก็บเกี่ยว 110 - 120 วัน หลังปลูกพันธุ์พื้นเมือง ระยะเก็บเกี่ยว 140 - 180 วัน หลังปลูก

2.1.5 การปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยว

ใช้ทำเมล็ดพันธุ์ เมล็ดถั่วหรั่งควรมีความชื้นประมาณ 10-11% สามารถเก็บไว้ในภาชนะบรรจุถ่ายเทอากาศที่สะดวกที่อุณหภูมิห้องสามารถเก็บได้นาน 1 ปี เมล็ดถั่วหรั่งสด 100 กิโลกรัม เมื่อแห้งดีแล้วจะเหลือน้ำหนักประมาณ 30 กิโลกรัมและเมื่อกระเทาะเปลือกออกจะเหลือน้ำหนักเมล็ดประมาณ 20-21 กิโลกรัม

2.1.6 การแปรรูปถั่วหรั่ง

การแปรรูปอาหาร ถั่วหรั่งต้ม เป็นการต้มใส่เกลือสำหรับกินเล่น เช่นเดียวกับถั่วลิสง ถั่วหรั่งฝักอ่อน มีรสชาติหวานและกรอบใช้เป็นผักในผัดต่างๆได้ เมล็ดแห้ง ใช้บดทำแป้งเพื่อประกอบอาหารตามต้องการเมล็ดสดหรือแห้งต้มสุกแกะเปลือก ใช้ใส่อาหารคาวซึ่งปกติใช้เมล็ดถั่วลิสงหรือใช้ทำไส้ขนม การแปรรูปอุตสาหกรรมในลักษณะถั่วหรั่งต้มน้ำเกลือบรรจุกระป๋อง สำหรับใช้ในการประกอบอาหาร เช่นเดียวกับถั่วลันเตา หรือส่วนประกอบในอาหารกินเล่น หรืออาหารเพื่อสุขภาพ (สุกัญญา พัวพันธ์, 2004)

2.1.7 องค์ประกอบของสารอาหารของถั่วหรั่ง

องค์ประกอบของสารอาหารภายในเมล็ดถั่วหรั่ง เป็นแหล่งของสารที่มีความอุดมสมบูรณ์มาก ดังตารางที่ 2.1 โดยเมล็ดถั่วหรั่งแห้งมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 61.3 และมีปริมาณโปรตีนร้อยละ 18.8 และจากการตรวจวิเคราะห์ถั่วหรั่งจากแหล่งปลูกต่างๆ พบการปนเปื้อนของเชื้อรา *Aspergillus feavus* แต่ไม่พบสารอัลฟาทอกซิน เมล็ดถั่วหรั่งมีกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกาย ที่ร่างกายจำเป็นต้องนำไปใช้ แต่ไม่สามารถสังเคราะห์ได้ หรือสังเคราะห์ได้ไม่พอเพียง ต้องได้รับจากอาหารที่บริโภค ซึ่งในเมล็ดถั่วหรั่งมีกรดอะมิโนที่จำเป็นหลายชนิด เช่น Leucine, Lysine, Valine, Phenylalanine, Isoleucine, Threonine และ Methionine โดยในเมล็ดถั่วหรั่งจะพบกรดอะมิโนชนิด Leucine ในปริมาณมากที่สุด ดังตารางที่ 2.2

ภูมิสันต์ จีวิพันธ์พงศ์ และ ธนาพร วีระประดิษฐ์ศิลป์ (2536) ได้ศึกษาองค์ประกอบถั่วหรั่งเมล็ดแห้ง พบว่าประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต 51.3 % โปรตีน 18.8 % ไขมัน 5.2 % เส้นใย 3.0 % และ เถ้า 1.8 % ซึ่งพบว่าถั่วหรั่งเป็นอาหารที่อุดมด้วยคาร์โบไฮเดรต สามารถรับประทานสด ย่าง ต้ม หรือบดเป็นแป้งสำหรับทำขนม นอกจากนี้พบว่าถั่วหรั่งอ่อน ๆ สามารถใช้เป็นอาหารในระหว่างการเดินทางหรือนำถั่วมาคั่วใช้แทนเมล็ดกาแฟ

Amarteifio และ Moholo (1998) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของแป้งถั่ว 4 ชนิด ได้แก่ แป้งถั่วหรั่ง แป้งถั่วมารามา (marama bean) แป้งถั่วเขียว และแป้งถั่วทีพารี (Tepary bean) พบว่าแป้งทั้ง 3 ชนิดเป็นแหล่งโปรตีนที่ดี และผลการทดลองพบว่าแป้งถั่วหรั่ง และแป้งถั่วทีมารีมีปริมาณ

คาร์โบไฮเดรตสูงสุดคือเท่ากับ 63.5 และ 63.8% ตามลำดับ ส่วนแป้งถั่วมารามา พบว่ามีปริมาณคาร์โบไฮเดรตต่ำสุด (24.1%) แป้งถั่วหรั่งมีปริมาณโปรตีนต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งถั่วชนิดอื่น และพบว่าแป้งถั่วหรั่งมีปริมาณโปรแตสเซียมสูงสุดคือเท่ากับ 1240 มิลลิกรัม/100 กรัม ขณะที่แป้งถั่วมารามา มีปริมาณต่ำสุด 776 มิลลิกรัม/100 กรัม และพบว่าแป้งถั่วหรั่งและแป้งถั่วทีพารี มีปริมาณแคลเซียมต่ำสุด คือ 78 และ 88 มิลลิกรัม/100 กรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของถั่วหรั่งสดและแห้ง 100 กรัม

องค์ประกอบทางเคมี	ถั่วหรั่งสด	ถั่วหรั่งแห้ง
พลังงาน (แคลอรี่)	152	357
ความชื้น (กรัม)	57.3	10.3
โปรตีน (กรัม)	7.8	18.8
ไขมัน (กรัม)	3.1	6.2
คาร์โบไฮเดรต (กรัม)	30.0	61.3
เส้นใย (กรัม)	3.0	4.8
เถ้า (กรัม)	1.8	3.4
แคลเซียม [Ca] (มิลลิกรัม)	14	62
ฟอสฟอรัส [P] (มิลลิกรัม)	258	276
เหล็ก [Fe] (มิลลิกรัม)	1.2	12.2

ที่มา: http://members.thai.net/oard8/pea/index-pea.htm

ตารางที่ 2.2 ชนิดและปริมาณกรดอะมิโนในถั่วหรั่งแห้ง

ชนิดกรดอะมิโน	ปริมาณกรดอะมิโน (mg/gN)
Leucine	494-510
Lysine	400-430
Valine	331-340
Phenylalanine	219-360
Isoleucine	275-280
Threonine	219-240
Methionine	113-120
Cysine	70-180

ที่มา: http://members.thai.net/oard8/pea/index-pea.htm

ภายในเมล็ดถั่วหรั่งยังพบกรดไขมันชนิดอิ่มตัว เช่น Palmitic, Stearic, Arachidic และ Behenic นอกจากนี้ยังพบกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว เช่น Oleic และ Linoleic อีกด้วย โดยพบในปริมาณที่แตกต่างกันดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ปริมาณองค์ประกอบของกรดไขมันในถั่วหรั่งแห้ง

ชนิดกรดไขมัน		สัดส่วน (%)
Palmitic	(C 16:0)	19.4
Stearic	(C 18:0)	11.8
Oleic	(C 18:1)	24.4
Linoleic	(C 18:2)	34.2
Arachdic	(C 20:0)	5.90
Behenic	(C 22:0)	4.90

ที่มา: http://members.thai.net/oard8/pea/index-pea.htm

นอกจากนี้ในเมล็ดถั่วหรั่งยังพบวิตามินที่จำเป็น ซึ่งร่างกายควรจะได้รับ เช่น Ascorbic acid, Thiamine, Niacin และRiboflavin ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ปริมาณวิตามินในถั่วหรั่งแห้ง 100 กรัม

ชนิดวิตามิน	น้ำหนัก (mg)
B-carotene equivalent	0.10
Thiamine	0.47
Riboflavin	0.14
Niacin	1.80
Ascorbic acid	0-8

ที่มา: http://members.thai.net/oard8/pea/index-pea.htm

2.2 แป้งและสตาร์ชจากถั่วหรั่ง

2.2.1 องค์ประกอบของแป้งถั่วหรั่ง

แป้งถั่วหรั่งประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยองค์ประกอบอื่น ๆ ได้แก่ ไขมัน โปรตีน และเถ้า ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งถั่วหรั่ง

ชนิดแป้ง	โปรตีน (%)	ไขมัน (%)	เถ้า (%)	เยื่อใย (%)	คาร์โบไฮเดรต (%)
ถั่วหรั่ง[a]	18.3	6.6	4.4	5.2	63.5
ถั่วหรั่ง[b]	18.8	5.2	1.8	3.0	51.3
ถั่วหรั่ง[c]	20.7	1.24	0.63	0.83	67.1
ถั่วเขียว[a]	26.37	1.1	4.3	4.3	59.8
ถั่วทีพารี[a]	24.74	0.9	3.8	4.9	63.8

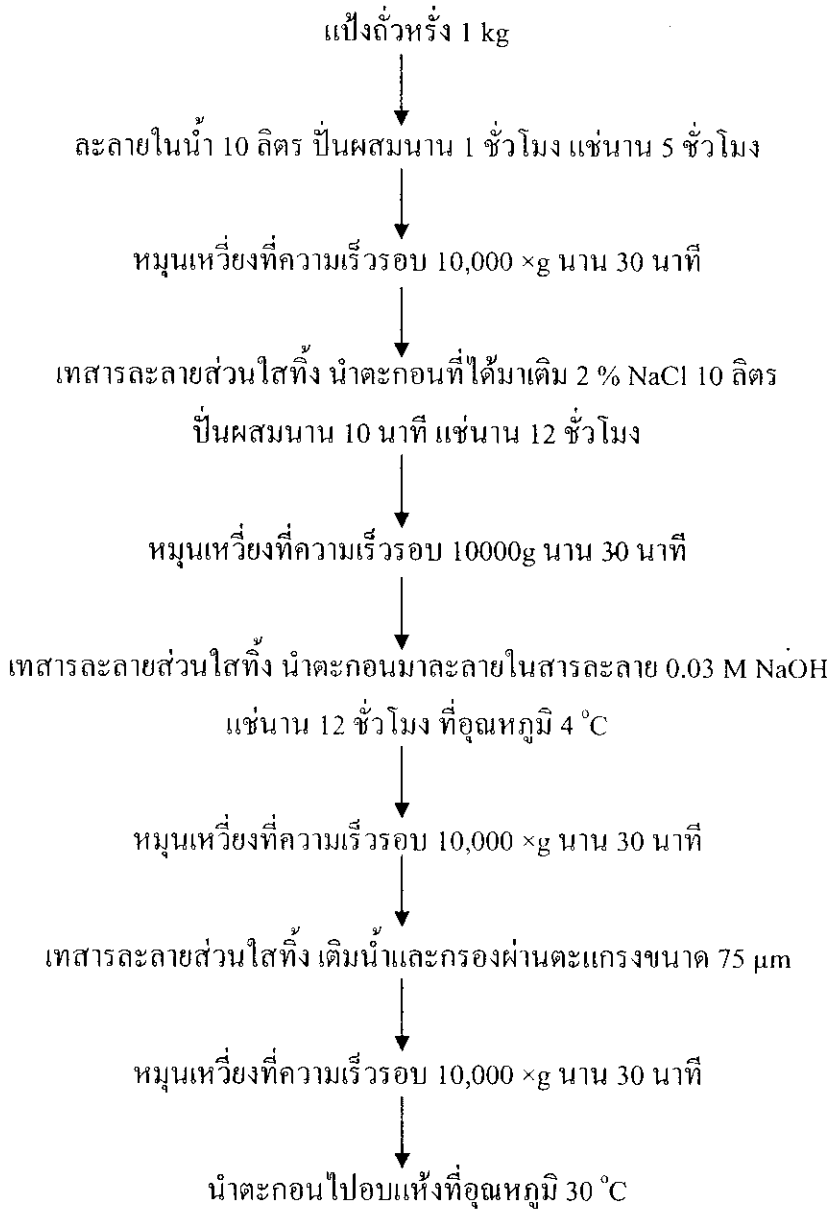
ที่มา: [a] Amarteifio และ Moholo (1998)

[b] ภูมิสันต์ จีวิพันธ์พงศ์ และ ธนาพร วีระประดิษฐ์ศิลป์(2536)

[c] Adebowale และคณะ (2002)

2.2.2 การผลิตสตาร์ชถั่วหรั่ง

Adebowale และคณะ (2002) ทำการศึกษาการผลิตสตาร์ชจากถั่วหรั่ง ซึ่งสามารถทำได้โดยการนำแป้งถั่วหรั่ง 1 kg ละลายในน้ำ 10 ลิตร ปั่นผสมนาน 1 ชั่วโมง แช่นาน 5 ชั่วโมง นำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 10000g นาน 30 นาที เทสารละลายส่วนใสทิ้ง นำตะกอนที่ได้มาเติม 2 % NaCl 10 ลิตร ปั่นผสมนาน 10 นาที แช่นาน 12 ชั่วโมง นำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 10,000 ×g นาน 30 นาที นำตะกอนมาละลายในสารละลาย 0.03 M NaOH แช่นาน 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 4 °C นำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 10,000 ×g นาน 30 นาที นำตะกอนมาเติมน้ำและกรองผ่านตะแกรงขนาด 75 μm นำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 10,000 ×g นาน 30 นาที หลังจากนั้นนำตะกอนที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 30 °C ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ขั้นตอนการผลิตสตาร์ชจากถั่วหรั่ง

ที่มา: Adebowale และคณะ (2002)

จากการผลิตสตาร์ชถั่วหรั่งโดยวิธีข้างต้น พบว่าสตาร์ชถั่วหรั่งที่ผลิตได้มีปริมาณร้อยละผลผลิตเท่ากับ 37.50 และมีองค์ประกอบของโปรตีนร้อยละ 1.00 เถ้าร้อยละ 0.04 ไขมันร้อยละ0.08 ความชื้นร้อยละ 14.80 และมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 84.1

2.2.3 ลักษณะทางโครงสร้างของสตาร์ช

2.2.3.1 ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ช

สตาร์ชที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดสตาร์ช (granule) ขนาดเล็ก โดยเมื่อตรวจดูลักษณะของเม็ดสตาร์ชชนิดต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา และแบบอิเล็กตรอน

(Scanning Electron Microscope) พบว่าเม็ดสตาร์ชมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งของสตาร์ชนั้นๆ สำหรับสตาร์ชที่สกัดจากถั่วหรั่งนั้น เมื่อนำมาตรวจดูลักษณะของเม็ดสตาร์ชด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน (SEM) แล้วพบว่าสตาร์ชจากถั่วหรั่ง มีรูปร่างไม่แน่นอน โดยมีรูปร่างเป็นทรงกลม ส่วนใหญ่มีลักษณะโค้งเว้า มีขนาดความกว้างในช่วง 18-36 μm และความยาวในช่วง 20-61 μm (Adebowale and Lawal, 2002)

2.2.3.2 ชนิดและปริมาณของผลึก

เม็ดสตาร์ชมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก(semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกทินจะจัดเรียงตัวในเม็ดสตาร์ชเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึก(crystallite) และส่วนอสัณฐาน (amorphous หรือ gel phase) ส่วนสายโซ่สั้นของอะไมโลเพกทินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวม้วนคู่ (double helices) ซึ่งบางส่วนจะเกิดเป็นโครงสร้างที่เป็นผลึก ส่วนอะสัณฐานของเม็ดสตาร์ชจะประกอบด้วยโมเลกุลของอะไมโลส และสายโซ่ของอะไมโลเพกทิน เม็ดสตาร์ชจะมีโครงสร้างผลึก 3 แบบ ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ถ้าเกิดการเรียงตัวหนาแน่นมากจะเกิดเป็นผลึกแบบ A (สตาร์ชจากธัญพืชต่างๆ) ถ้าเรียงตัวกันอย่างหลวมๆจะเกิดผลึกแบบ B (สตาร์ชจากพืชหัว) ถ้าเกิดการเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C (สตาร์ชจากพืชตระกูลถั่ว) โครงสร้างของผลึกที่ต่างกันจะให้ลักษณะการกระจายตัวของแสงที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถตรวจสอบชนิดโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชได้โดยใช้เทคนิครังสีเอ็กซเรย์(wild angle x-ray diffraction,WAXS) สตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกต่างกันจะให้รูปแบบการหักเหรังสีเอ็กซเรย์ต่างกัน

2.2.4 สมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ช

2.2.4.1 การดูดซับน้ำและน้ำมัน

เมื่อเติมน้ำและน้ำมันลงในสตาร์ชและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เม็ดสตาร์ชจะดูดน้ำ และน้ำมันที่เติมลงไปภายใต้สภาวะบรรยากาศของห้อง จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดสตาร์ชกับน้ำ และน้ำมันที่เติมและความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ สำหรับความสามารถในการดูดซับน้ำและน้ำมันของสตาร์ชถั่วหรั่งมีค่าเท่ากับ 2.00 กรัมต่อกรัม และ 1.76 กรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความสามารถในการดูดซับน้ำและน้ำมันของแป้งถั่วหรั่ง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.60 กรัมต่อกรัม และ 1.96 กรัมต่อกรัม ตามลำดับ (Adebowale *et al.*, 2002)

2.2.4.2 กำลังการพองตัว (Swelling power) และการละลาย (Solubility)

เมื่อมีการให้ความร้อนแก่น้ำสตาร์ช เม็ดสตาร์ชจะเกิดการพองตัวและบางส่วนของสตาร์ชจะละลายออกมา กำลังการพองตัวของสตาร์ชจะเป็นปริมาตรหรือน้ำหนักของเม็ดสตาร์ชที่เพิ่มขึ้น ณ อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มสารละลายน้ำสตาร์ช ส่วนความสามารถในการละลายจะเป็นน้ำหนักของของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่สามารถละลายน้ำได้ ที่แยกออกจากส่วนของเม็ดสตาร์ชที่พองตัว ในการวิเคราะห์หากำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ช จะต้องให้มีน้ำในปริมาณที่มาก

เกินพอ เพื่อให้เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวได้อย่างอิสระ โดยจะต้องไม่มีการแตกออกของเม็ดสตาร์ช ระหว่างการบ่ม

Adebowale และคณะ (2002) ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้ง สตาร์ช และสตาร์ชดัดแปรจากถั่วหรั่ง พบว่าค่ากำลังการพองตัวของทั้งแป้งและสตาร์ชดัดแปรมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการให้ความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีแอซิเลชัน (acetylated starch) มีค่ากำลังการพองตัวสูงสุด (3.04 กรัม/กรัม) ส่วนสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีออกซิเดชัน (oxidizated starch) มีค่าความสามารถการดูดซับน้ำมันและน้ำสูงสุด (2.40 กรัม/กรัม) นอกจากนี้พบว่าการดัดแปรสตาร์ชทั้งสองวิธีนั้นส่งผลให้อุณหภูมิการเกิดเจลาทิไนเซชัน(gelatinization temperature) ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) และค่าความหนืดขณะที่สตาร์ชเย็นตัวมีค่าลดลง และนอกจากนี้พบว่าค่าความเข้มข้นต่ำสุดของการเกิดเจลอยู่ในช่วง 6 ถึง 10% (w/v)

2.2.4.3 การเกิดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ช

โมเลกุลของสตาร์ชประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดสตาร์ชอยู่ในรูปของร่างแห (micelles) ดังนั้นการจัดเรียงตัวลักษณะนี้จะทำให้เม็ดสตาร์ชละลายในน้ำเย็นยาก ดังนั้นในขณะที่สตาร์ชอยู่ในน้ำเย็น เม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำและพองตัวเล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำสตาร์ช พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดสตาร์ชจะดูดน้ำแล้วพองตัว ส่วนผสมของน้ำสตาร์ชจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆเม็ดสตาร์ชเหลือน้อยลง เม็ดสตาร์ชเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาทิไนเซชัน(gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเจลาทิไนซ์ เมื่อตรวจวัดด้วยเครื่องมือวัดความหนืดมักเรียกจุดนี้ว่าอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด(pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting time) ซึ่งจะแตกต่างกัน แล้วแต่ชนิดของสตาร์ช

2.2.4.4 สมบัติทางความหนืดของสตาร์ช

โมเลกุลของสตาร์ชประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดสตาร์ชอยู่ในรูปของร่างแห (micelles) ดังนั้นการจัดเรียงตัวลักษณะนี้จะทำให้เม็ดสตาร์ชละลายในน้ำเย็นยาก ดังนั้นในขณะที่สตาร์ชอยู่ในน้ำเย็น เม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำและพองตัวเล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำสตาร์ช พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดสตาร์ชจะดูดน้ำแล้วพองตัว ส่วนผสมของน้ำสตาร์ชจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆเม็ดสตาร์ชเหลือน้อยลง เม็ดสตาร์ชเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาทิไนเซชัน (gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเจลาทิไนซ์ เมื่อตรวจวัดด้วยเครื่องมือวัดความหนืดมักเรียกจุดนี้ว่าอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด(pasting

temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting time) ซึ่งจะแตกต่างกัน แล้วแต่ชนิดของสตาร์ช

Adebowale และคณะ (2002) ศึกษาคุณสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชถั่วหรั่ง โดยทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง บราเบนเดอร์อะไมโลกราฟ พบว่าสตาร์ชถั่วหรั่งมีอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดความหนืด เท่ากับ 84 องศาเซลเซียส ค่าความหนืดสูงสุด เท่ากับ 790 BU และพบว่ามีค่า Setback เท่ากับ 1210 BU ตามลำดับ และเมื่อแบ่งประเภทของสตาร์ชถั่วหรั่งตามกำลังการพองตัว พบว่าสตาร์ชถั่วหรั่งเป็นแบบบี คือเม็ดสตาร์ชมีกำลังการพองตัวปานกลาง

2.2.4.5 การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช

เมื่อสตาร์ชได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาไนเซชัน แล้วให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้าอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียว คล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือการคืนตัว เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีก ลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งเรียกว่า syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น

การคืนตัวของสตาร์ชเปียกและสารละลายสตาร์ชทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น มีลักษณะขุ่นและทึบแสง เกิดชิ้นส่วนที่ไม่ละลายในสตาร์ชเปียกที่ร้อน เกิดการตกตะกอนอนุภาคสตาร์ชที่ไม่ละลาย ทำให้เกิดเจลและโมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในถูกบีบออกมานอกเจล ในการคืนตัวของสตาร์ชเมื่อเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จะเกิดการตกตะกอน เมื่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขุ่น กลไกการคืนตัวของสตาร์ช

การคืนตัวของสตาร์ชขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของสตาร์ช ความเข้มข้นของสตาร์ช กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะมิโลส อะมิโลเพกทิน และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ในสตาร์ช ปริมาณและขนาดของอะไมโลสมีความสำคัญต่อการคืนตัวของสตาร์ช สตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็ว

2.3 น้ำตาลไดแซคคาไรด์ (Disaccharide)

ไดแซคคาไรด์ เป็นน้ำตาลโมโนแซคคาไรด์ 2 หน่วยมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bond) และการย่อยน้ำตาลไดแซคคาไรด์ด้วยกรด หรือเอนไซม์จะได้ผลเป็นน้ำตาลโมโนแซคคาร์ไรด์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบของไดแซคคาไรด์ ในธรรมชาติพบว่ามีน้ำตาลไดแซคคาไรด์อยู่ 3 ชนิดที่อยู่ในสถานะอิสระ คือ น้ำตาลซูโครส ในผลไม้หลายชนิด น้ำตาลแลกโทสในนม และ

น้ำตาลทรีฮาโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบของเลือดแมลงบางชนิด อย่างไรก็ดีน้ำตาลไดแซคคาไรด์ที่สำคัญมากที่สุดในอาหารคือ น้ำตาลซูโครส มอลโทส และแลกโทส ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ชนิดโครงสร้าง แหล่งที่พบ และหน้าที่พบและหน้าที่ของน้ำตาลไดแซคคาไรด์

น้ำตาล	โครงสร้าง	แหล่งที่พบ
Sucrose *non reducing sugar	Glc α (1⟶2) Fru β	ผลไม้, น้ำอ้อย, น้ำมะพร้าว น้ำสับปะรด น้ำตาลทราย, น้ำผึ้ง, แครอท
Lactose	Gal β (1⟶4) Glc	น้ำนม
Maltose	Glc α (1⟶4) Glcα	แป้งในพืช, ไกลโคเจนในสัตว์

ที่มา: Whistler และ BeMiller (1997)

2.3.1 น้ำตาลซูโครส

น้ำตาลซูโครสเกิดมาจากน้ำตาลโมโนแซคคาไรด์ 2 ชนิดคือ แอลฟา-กลูโคส 1 โมเลกุล กับเบตา-ฟรักโทส อีก 1 โมเลกุล มาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ1-2 ไกลโคซิดิก (ภาพที่ 2.2) ทำให้กลุ่มคาร์บอนิล 2 กลุ่มถูกใช้ไปในการเชื่อมต่อน้ำตาลโมโนแซคคาไรด์ทั้งสองนั้น ดังนั้นน้ำตาลซูโครสจึงไม่มีกลุ่มคาร์บอนิลอิสระเหลือที่จะรีดิวซ์สารละลายทองแดง นั่นคือน้ำตาลซูโครสซึ่งไม่ใช่น้ำตาลรีดิวซ์ นอกจากนี้ยังไม่สามารถเกิดมิวทาโรเทชันด้วย

น้ำตาลซูโครสหรือแซ็กคาโรส (saccharose) เป็นน้ำตาลที่พบอยู่ทั่ว ๆ ไปในพืช ซึ่งมีปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 0.1 – 25 โดยเฉพาะอ้อย และบีท (beets) มีน้ำตาลซูโครสมาก ซึ่งใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบในการผลิตน้ำตาลซูโครสเป็นอุตสาหกรรม และยังพบน้ำตาลซูโครสได้ในผลไม้สุกด้วย โมเลกุลของน้ำตาลซูโครสประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสต่อน้ำตาลฟรักโทสด้วยพันธะ α - (1⟶2) ทำให้ไม่มีหมู่แอลดีไฮด์และหมู่คีโตนอิสระ ซึ่งเป็น functional group เหลืออยู่ในโมเลกุล น้ำตาลซูโครสจึงเป็น nonreducing suger เพียงชนิดเดียวที่ไม่สามารถรีดิวซ์ สารละลาย Fehling ได้และไม่เกิด mutarotation เมื่ออยู่ในรูปสารละลายน้ำตาลซูโครสไม่คงตัวในสารละลายที่เป็นกรด จะถูกไฮโดรไลซ์ได้เป็นน้ำตาลกลูโคสและฟรักโทส และถ้าได้รับความร้อยถึงอุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวได้เป็นคาราเมล (caramel) มีสีน้ำตาล

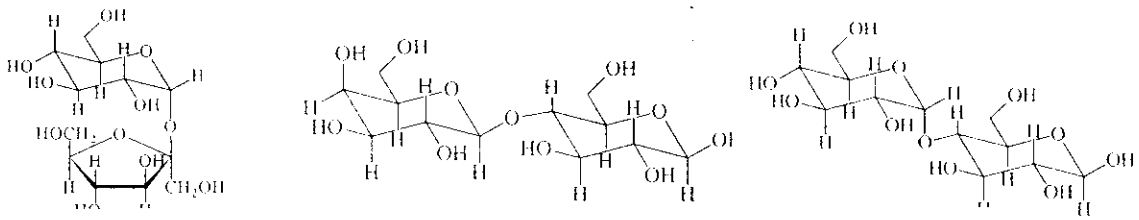
2.3.2 น้ำตาลแลกโทส

น้ำตาลแลกโทส ประกอบขึ้นด้วยน้ำตาลกลูโคส 1 โมเลกุลกับน้ำตาลกาแลกโทสอีก 1 โมเลกุล ซึ่งเชื่อมกันด้วยพันธะ1-4 ดังแสดงภาพที่ 2.2 น้ำตาลแลกโทสมี 2 รูปคือ แอลฟา และเบตา สามารถแสดงมิวทาโรเทชัน และเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ น้ำตาลแลกโทส หรือ 4-O-β-D-

galactopyranosyl-D–glucopyranose เป็นน้ำตาลที่พบเฉพาะในน้ำนมของสัตว์ที่เลี้ยงลูกด้วยน้ำนมเท่านั้น จึงเรียกว่า milk sugar ในน้ำนมวัวมีน้ำตาลแลคโทสประมาณร้อยละ 4.4 – 5.2 (เฉลี่ยประมาณร้อยละ 4.8) และมีอยู่ในน้ำนมคนประมาณร้อยละ 7 น้ำตาลแลคโทสสามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ด้วยเอนไซม์แลคเทส (β-D–galactosidase) หรือด้วยกรดแก่ ได้เป็นน้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลกาแลคโทส เอนไซม์แลคเทสจะเกาะอยู่กับเมมเบรนที่อยู่ใน brush border ของเซลล์เยื่อบุผนัง (epithelial cell) สำไส้เล็ก ส่วนกรดอินทรีย์บางชนิด เช่น กรดซิตริกสามารถไฮโดรไลซ์น้ำตาลซูโครสแต่ไม่สามารถไฮโดรไลซ์น้ำตาลแลคโทสได้ น้ำตาลแลคโทส โมโนไฮเดรต (แอลฟา–ไอโซเมอร์) มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 202 องศาเซลเซียส ส่วนน้ำตาลแลคโทสที่อยู่ในรูปแอนไฮดรัสแอลฟา–แลคโทส และบีตา–แลคโทสมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 223 และ 252 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2545)

2.3.3 น้ำตาลมอลโทส

น้ำตาลมอลโทส ประกอบขึ้นด้วยน้ำตาลกลูโคส 2 โมเลกุล มาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ 1-4 นั่นคือคาร์บอนตำแหน่งที่หนึ่งของน้ำตาลกลูโคสโมเลกุลหนึ่งเชื่อมกับคาร์บอนตำแหน่งที่สี่ของอีกโมเลกุลหนึ่ง ดังแสดงภาพที่ 2.2 ดังนั้น กลุ่มคาร์บอนิลของโมเลกุลที่ใช้คาร์บอนตำแหน่งที่สี่ในการเชื่อมต่อนั้นยังคงอิสระอยู่ นั่นคือ น้ำตาลมอลโทสจะเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ และแสดงมิวทาโรเทชัน มีสเตอริโอไอโซเมอร์ คือ แอลฟา และเบตา น้ำตาลนี้พบมากในเมล็ดธัญพืชที่กำลังงอก โดยเฉพาะข้าวบาร์เลย์ ข้าวมอลต์ และน้ำเชื่อมข้าวโพด (corn syrup) น้ำตาลมอลโทสมีสมบัติเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ ละลายได้ดีในน้ำ เกิด mutarotation และเกิดกระบวนการหมักได้ น้ำตาลมอลโทสมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 102 – 103 องศาเซลเซียส



(ก) (ข) (ค)

ภาพที่ 2.2 สูตรโครงสร้างของน้ำตาลไดแซคคาไรด์ (ก) น้ำตาลแลคโทส (ข) น้ำตาลซูโครส (ค) น้ำตาลมอลโทส

ที่มา: Stick (2000)

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. ศึกษาวิธีการที่เหมาะสมในการเตรียมสตาร์ชจากถั่วหรั่ง
2. ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างในระดับโมเลกุล และสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งและสตาร์ชจากถั่วหรั่ง
3. ศึกษาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบ โครงสร้าง และสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งและสตาร์ชจากถั่วหรั่งเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการแปรรูปและผลิตผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่มจากถั่วหรั่งต่อไป

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 วัตถุดิบ สารเคมี และอุปกรณ์

3.1.1 วัตถุดิบ และสารเคมี

3.1.1 แป้งถั่วหรั่ง

3.1.2 น้ำตาลซูโครส

3.1.3 น้ำตาลแลคโตส

3.1.4 น้ำตาลมอลโตส

3.1.5 H_2SO_4

3.1.6 NaOH

3.1.7 HCl

3.1.8 Ethyl alcohol

3.1.9 Ethanol

3.1.10 Iodine

3.1.11 ปิโตรเลียมอีเทอร์

3.1.12 กรดบอริก

3.1.2 อุปกรณ์

3.1.2.1 เครื่องวัดปริมาณผลึก (X-Ray Diffractometer) ยี่ห้อ Phillips รุ่น X'Pert MPD ประเทศเนเธอร์แลนด์

3.1.2.2 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) ยี่ห้อ SEM รุ่น JSM-5800LV ประเทศญี่ปุ่น

3.1.2.3 เครื่อง Brabender รุ่น Viscograph ประเทศเยอรมัน

3.1.2.4 เครื่อง Rheometer ยี่ห้อ Haake รุ่น RheoStressRS75 ประเทศเยอรมัน

3.1.2.5 เครื่องDifferential Scanning Caloremeter ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น DSC7 ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.2.6 เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle Size Analyser) ยี่ห้อ COULTER รุ่น LS230 ประเทศฯ สหรัฐอเมริกา

3.1.2.7 เครื่องอินฟาเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transfer Infrared Spectrometer, FTIR) ยี่ห้อ Bruker รุ่น IFS-48 ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 วิธีผลิตแป้งจากถั่วหรั่ง

เตรียมแป้งจากถั่วหรั่ง โดยนำถั่วหรั่งสดพันธุ์สงขลา 1 ที่อายุประมาณ 4 เดือน จากสวนเกษตรกร จังหวัดพัทลุง ทำการคัดเลือก คัดเมล็ดที่เสียออก แล้วนำถั่วที่ได้ไปแช่น้ำเป็นเวลา 15-20 ชั่วโมง จากนั้นนำมาปลอกเปลือก และลอกส่วนเยื่อหุ้มสีแดงออกซึ่งเป็นเปลือกข้างใน จากนั้นนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาดหมุนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยถั่วหรั่งมีปริมาณความชื้นสุดท้ายประมาณ 10% (wb) จากนั้นนำมาบดละเอียด แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 μm นำไปบรรจุในถุงอลูมิเนียมแบบสุญญากาศเพื่อป้องกันความชื้น และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

3.2.2 การผลิตสตาร์ชถั่วหรั่ง

ศึกษาวิธีการผลิตสตาร์ชจากแป้งถั่วหรั่ง โดยนำแป้งถั่วหรั่งใส่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น (0.3% w/v) และที่อัตราส่วนแป้ง ต่อ NaOH อัตราส่วน 1 : 10 นำไปกวน 4 ชั่วโมง แล้วนำไปกรองผ่านตะแกรงขนาด 60 เมช จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงด้วยอัตราเร็ว 3500 รอบต่อนาที นาน 30 นาที เทสารละลายส่วนใสทิ้ง นำตะกอนที่ได้มาละลายน้ำในอัตราส่วน 1:10 นำไปหมุนเหวี่ยงด้วยอัตราเร็ว 3500 รอบต่อนาที นาน 30 นาที ทำการล้างตะกอนด้วยน้ำซ้ำอีก 2 ครั้ง จากนั้นนำตะกอนที่ได้ละลายน้ำในอัตราส่วน 1:10 แล้วปรับ pH ของสารแขวนลอยสตาร์ชเป็นกลางด้วยกรดไฮโดรคลอริก(HCl) 0.1 N นำไปหมุนเหวี่ยงด้วยอัตราเร็ว 3500 รอบต่อนาที นาน 30 นาที หลังจากนั้นนำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปบดและกรองผ่านตะแกรงขนาด 60 เมช บรรจุในบรรจุภัณฑ์ที่ป้องกันอากาศและความชื้น (ดัดแปลงจาก Adebowale และ Lawal, 2002; Adebowale และคณะ, 2002)

3.2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งและสตาร์ชจากถั่วหรั่ง

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง และสตาร์ชถั่วหรั่งที่ผลิตได้จากข้อ (3.2.1 และ 3.2.2) โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น เถ้า โปรตีน และไขมัน (AOAC, 1999) และวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลส (Shanthy และคณะ., 1980)

3.2.4 การศึกษาสมบัติทางโครงสร้างของสตาร์ชถั่วหรั่ง

ตรวจสอบลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ชถั่วหรั่ง ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ตรวจสอบชนิด และปริมาณผลึกของเม็ดสตาร์ช โดยใช้เครื่อง X- ray diffractometer ตรวจวัดขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ช โดยใช้เครื่อง Particle Size Analyzer

3.2.5 การศึกษาสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งและสตาร์ชจากถั่วหรั่ง

3.2.5.1 ความสามารถในการดูดซับน้ำและน้ำมัน (Water and oil absorption capacity)

นำสตาร์ชจากถั่วหรั่งมาผสมกับน้ำและน้ำมัน โดยทำการผสมสตาร์ชถั่วหรั่ง 1 กรัม ในน้ำหรือน้ำมันพืช 10 มิลลิลิตร จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปหมุน

เหวี่ยงที่ความเร็ว 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที วัดปริมาตรของสารละลายส่วนใส เพื่อคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับน้ำและน้ำมันในหน่วยมิลลิลิตรของน้ำและน้ำมันที่ถูกดูดซับต่อกรัมของสตาร์ชแห้ง (Adebowale and Lawal, 2004)

3.2.5.2 ความสามารถในการละลายของโปรตีน (Protein solbility)

ศึกษาความสามารถในการละลายของโปรตีนของแป้งถั่วหรั่งดัดแปลงจาก Were และคณะ(1997) โดยผสมตัวอย่างแป้ง 125 กรัม ในน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร กวนแป้งให้เข้ากันตลอด 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 15000 rpm ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที นำสารละลายส่วนใสที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนตามวิธีของ AOAC (1999) จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าการละลายโปรตีน

3.2.5.3 กำลังการพองตัวและการละลาย (Swelling power and Solubility)

เตรียมสารแขวนลอยจากสตาร์ชถั่วหรั่งให้มีความเข้มข้นร้อยละ 0.7 (โดยน้ำหนักแห้ง) นำไปให้แช่ในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที คนตลอดเวลา นำออกมาทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 2200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นดูดสารละลายส่วนใสใส่ในภาชนะที่ทราบน้ำหนัก และนำไปอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณน้ำหนักของสตาร์ชส่วนที่ละลายน้ำได้ (สมการที่ 3.1) ส่วนสตาร์ชเปียกในหลอดให้นำมาชั่งน้ำหนัก ได้เป็นน้ำหนักของสตาร์ชส่วนที่พองตัวได้ จากนั้นนำค่าน้ำหนักที่ได้มาคำนวณหาค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ช ดังสมการที่ 3.2 (Schoch , 1964)

$$\text{ร้อยละการละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักส่วนที่ละลายน้ำ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}} \times 100 \qquad (3.1)$$

$$\text{กำลังการพองตัว} = \frac{\text{น้ำหนักสตาร์ชที่พองตัว}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}} \qquad (3.2)$$

3.2.5.4 สมบัติเจลาติไนเซชัน (Gelatinisation properties)

โดยการเตรียมตัวอย่างสารแขวนลอยสตาร์ชข้าวในน้ำด้วยอัตราส่วน 1 : 4 แล้วนำตัวอย่างไปให้ความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) อัตรา 10°C/นาที ที่ช่วงอุณหภูมิ 10-95 องศาเซลเซียส ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature, T_o) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (peak temperature, T_p) และอุณหภูมิสุดท้าย (conclusion temperature, T_c) ของการเกิดเจลาติไนเซชันและพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชัน (enthalpy of gelatinization, ΔH)

3.2.5.5 ผลของ pH ต่อสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชเพสท์

ศึกษาคุณสมบัติทางความหนืดด้วยเครื่อง Barbender viscograph โดยเตรียมสารแขวนลอยของสตาร์ช ความเข้มข้นร้อยละ 6 (โดยน้ำหนักแห้ง) ที่ระดับ pH ต่างๆ โดยใช้สารละลาย pH มาตรฐาน (buffer) ที่ค่า pH 3.6 4.6 5.6 และ 7.0 ตั้งโปรแกรมอุณหภูมิและเวลาให้ความร้อนของเครื่อง Barbender viscograph ดังนี้ เพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นในอัตรา 1.5 องศาเซลเซียส/นาที จนกระทั่ง อุณหภูมิสูงถึง 95 องศาเซลเซียส แล้วปล่อยให้อุณหภูมิคงที่นาน 15 นาทีแล้วจึงค่อยๆ ลดอุณหภูมิลงในอัตราเดียวกันจนถึงอุณหภูมิ 50องศาเซลเซียส และคงไว้ที่อุณหภูมินี้นาน 30 นาที บันทึกอุณหภูมิที่ความหนืดของสตาร์ชเกิดการเปลี่ยนแปลง (pasting temperature) และบันทึกความหนืดของสตาร์ชที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ (กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

3.2.5.6 พฤติกรรมการไหลของสตาร์ช (Fow behavior)

ศึกษาผลของความเข้มข้นของสตาร์ชถั่วหรั่งในช่วงร้อยละ 2 - 8 (โดยน้ำหนักแห้ง) ต่อพฤติกรรมการไหล โดยให้ความร้อนแก่สตาร์ชความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปวัดค่าความหนืดและความเค้นเฉือนที่อัตราการเฉือนในช่วง 20-400 s^{-1} ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ (rheometer) ที่ต่อกับหัววัดชนิด coaxial cylinder (Z41) ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดและความเค้นเฉือนกับอัตราการเฉือน ในรูปแบบสมการคณิตศาสตร์ คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว (consistency coefficient) และค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล (flow behavior index)

3.2.5.7 สมบัติวีสโคอีลาสติก (Viscoelastic Property)

ศึกษาผลของความเข้มข้นของสตาร์ชถั่วหรั่งในช่วงร้อยละ 10 - 35 (โดยน้ำหนักแห้ง) และผลของชนิดของน้ำตาล (น้ำตาลมอลโตส น้ำตาลแลกโตส และน้ำตาลซูโครส) ต่อสมบัติวีสโคอีลาสติกของสตาร์ช โดยเตรียมสตาร์ชถั่วหรั่งที่ความเข้มข้นต่าง ๆ แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา15 นาที แล้วนำไปวัดค่า Storage modulus (G') Loss modulus (G'') และค่า Loss tangent ($\tan \delta$) ที่ช่วงความถี่ 1- 100 Hz ที่อุณหภูมิ 60°C ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ที่ต่อกับหัววัดชนิด cone and plate

3.2.5.8 ผลของน้ำตาลต่อความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง และการละลาย (Freeze-thaw stability)

ศึกษาความสามารถในการคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งและการละลายของสตาร์ชถั่วหรั่ง และศึกษาผลของน้ำตาล 3 ชนิด ได้แก่ น้ำตาลซูโครส น้ำตาลแลคโตส และน้ำตาลมอลโทส ต่อความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง และการละลายของเจลสตาร์ชถั่วหรั่ง โดยเตรียมสารแขวนลอยที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 6 (โดยน้ำหนักแห้ง) เติมน้ำตาลซูโครส น้ำตาลแลคโตส และน้ำตาลมอลโทสปริมาณ 0.25 กรัมต่อกรัมของสตาร์ช นำไปให้ความร้อนด้วย เครื่อง Barbender viscograph

viscograph โดยเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นในอัตรา 3°C/min จนกระทั่ง อุณหภูมิเท่ากับ 95 องศาเซลเซียส แล้วคงไว้ที่อุณหภูมินี้นาน 15 นาที ชั่งน้ำหนักของสตาร์ชเปียกแล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ –20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปละลายที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำการแช่เยือกแข็งและละลายซ้ำจำนวน 5 รอบ จากนั้นนำเจลไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที แล้วคำนวณร้อยละการสูญเสียน้ำจากเจล (% syneresis) โดยใช้สมการที่ 3.3 (Hoover and Ratnayake, 2002)

$$\% \text{ syneresis} = \frac{\text{น้ำหนักน้ำที่แยกออกจากเจล}}{\text{น้ำหนักเจลเริ่มต้น}} \times 100 \qquad (3.3)$$

3.2.5.9 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสตาร์ชขณะเกิดรีโทรเกรเดชัน

ศึกษาผลของชนิดของน้ำตาล 3 ชนิด ได้แก่ น้ำตาลมอลโทส น้ำตาลแลกโทส และน้ำตาลซูโครส ต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของเจลสตาร์ชถั่วหรั่งขณะเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 ชั่วโมง โดยนำเจลสตาร์ชไปวัดค่าการดูดกลืนแสงอินฟาเรดที่ความถี่ในช่วง 1200 – 800 cm^{-1} โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) จากนั้นคำนวณอัตราส่วนค่าความเข้มของการดูดกลืนแสงอินฟาเรดที่ความถี่ 1047 cm^{-1} ต่อ 1022 cm^{-1} (ratio of short-range molecular order to amorphous, RSA) ที่เวลาการเก็บรักษาต่าง ๆ (van Soet และคณะ, 1995)

3.2.5.10 ความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ (Enzyme and acid hydrolysis)

วิเคราะห์ความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชถั่วหรั่ง โดยใช้วิธีของ Wang และคณะ (1995) และวิเคราะห์ความสามารถในการถูกย่อยด้วยกรดของสตาร์ชถั่วหรั่ง โดยวิธีของHoover และ Manuel (1996)

3.2.6 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design , CRD) โดยนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ Analysis of variance (ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างของสถิติโดยใช้ Duncan'multiple range test (DMRT)

สำนักทรัพยากรการเรียนรู้ดุษฎีบัณฑิต อรรถกระวีศุนทร

บทที่ 4
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

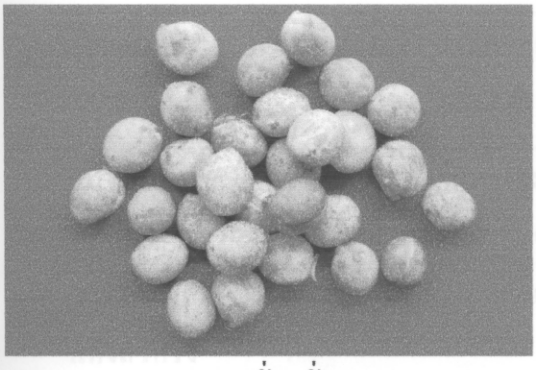
4.1. การผลิตแป้งและสตาร์ชจากถั่วหรั่ง

จากการผลิตแป้งถั่วหรั่ง โดยนำถั่วหรั่งสดมาแช่น้ำ แล้วนำมาปอกเปลือกชั้นนอกและเปลือกชั้นใน นำไปอบแห้ง และบดให้ละเอียดจนมีขนาด 60 เมช (ภาพที่ 4.1) พบว่าสามารถผลิตแป้งถั่วหรั่งได้ร้อยละ 11.02 ของถั่วหรั่งทั้งเมล็ด (รวมเปลือก) หรือคิดเป็นร้อยละ 33.33 ของถั่วหรั่งทั้งเมล็ด (ไม่รวมเปลือก) ดังแสดงในตารางที่ 4.1

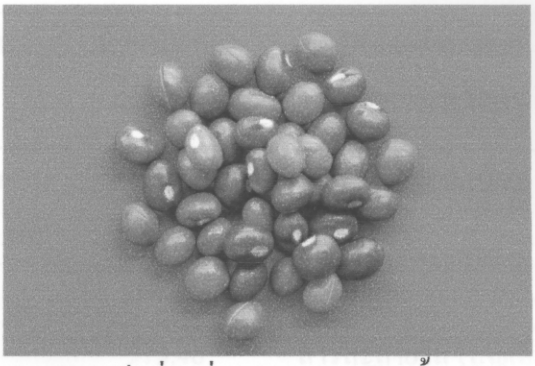
สำหรับการผลิตสตาร์ชจากถั่วหรั่ง โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้น 0.3% เพื่อสกัดองค์ประกอบอื่น ๆ ที่ไม่ใช่สตาร์ชออกไป จากนั้นนำไปอบแห้ง และบดให้ละเอียดจนมีขนาด 60 เมช พบว่าปริมาณผลผลิตของสตาร์ชถั่วหรั่งเท่ากับร้อยละ 45.57 ของน้ำหนักแป้งถั่วหรั่ง โดยพบว่าการสูญเสียส่วนใหญ่เกิดจากขั้นตอนแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการอบแห้ง ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ปริมาณผลผลิตในแต่ละขั้นตอนการผลิตแป้งถั่วหรั่ง

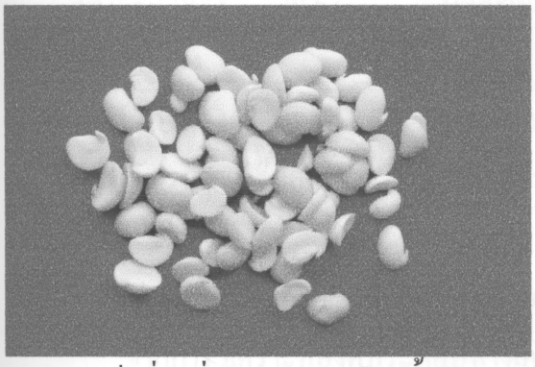
วัตถุดิบเข้ากระบวนการ	น้ำหนัก (กรัม)	กระบวนการผลิต	น้ำหนัก (กรัม)	ผลิตภัณฑ์ออกจากกระบวนการ
ถั่วหรั่งสด	100	แช่น้ำ	116.67	ถั่วที่แช่น้ำ
ถั่วหรั่งหลังแช่น้ำ	116.67	ปอกเปลือก	33.33	เม็ดถั่ว
			83.34	เปลือก (สูญเสีย)
เม็ดถั่วหรั่งหลังปอกเปลือก	33.33	อบแห้ง	14.44	เม็ดถั่วหลังอบแห้ง
			18.89	น้ำ (สูญเสีย)
แป้งถั่วหรั่งหลังอบแห้ง	14.44	บดละเอียด	14.33	แป้งถั่วหรั่งหลังบด
			0.11	แป้ง (สูญเสีย)
แป้งถั่วหรั่งที่ผ่านการบดละเอียด	14.33	ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 60 เมช	11.02	แป้งถั่วหรั่ง
			3.20	แป้ง (สูญเสีย)



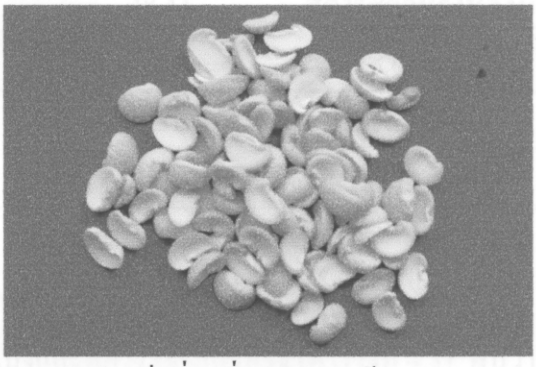
(ก) ถั่วหรั่งสด



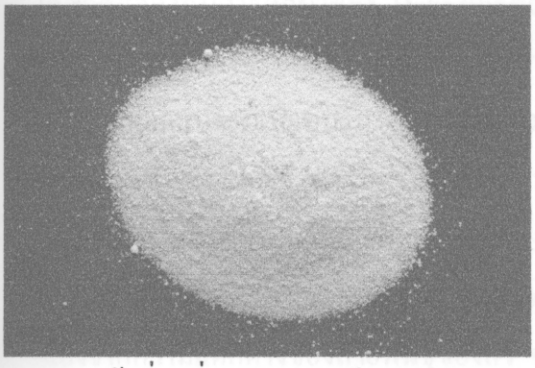
(ข) เม็ดถั่วหรั่งหลังปอกเปลือกชั้นนอก



(ค) เม็ดถั่วหรั่งหลังปอกเปลือกชั้นใน



(ง) เม็ดถั่วหรั่งหลังอบแห้ง



(จ) แป้งถั่วหรั่งหลังบดละเอียด

(ฉ) แป้งถั่วหรั่งหลังร่อนผ่านตะแกรง ขนาด 60 เมช

ภาพที่ 4.1 ลักษณะปรากฏของถั่วหรั่งและแป้งถั่วหรั่งที่ผ่านขั้นตอนการผลิตต่าง ๆ

ตารางที่ 4.2 ปริมาณผลผลิตในแต่ละขั้นตอนการผลิตสตาร์ชถั่วหรั่ง

วัตถุดิบเข้ากระบวนการ	น้ำหนัก (g)	กระบวนการผลิต	น้ำหนัก (g)	ผลิตภัณฑ์ออกจากกระบวนการ
แป้งถั่วหรั่ง	100	แช่ในสารละลาย NaOH (แป้งต่อ NaOH = 1:10)	1100	สารแขวนลอยแป้งถั่วหรั่ง
สารแขวนลอยแป้งถั่วหรั่ง	1100	ปั่นเหวี่ยง	126.54	ตะกอนสตาร์ชถั่วหรั่ง
			973.46	สารละลายใส (สูญเสีย)
สตาร์ชถั่วหรั่ง	126.54	อบแห้ง	49.67	สตาร์ชถั่วหรั่งหลังอบ
			76.87	น้ำ (สูญเสีย)
สตาร์ชถั่วหรั่งหลังอบแห้ง	49.67	บดละเอียด	48.44	สตาร์ชถั่วหรั่งหลังบด
			1.23	สตาร์ช (สูญเสีย)
สตาร์ชถั่วหรั่งที่ผ่านการบดละเอียด	48.44	ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 60 เมช	45.57	สตาร์ชถั่วหรั่ง
			2.87	สตาร์ช (สูญเสีย)

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งและสตาร์ชจากถั่วหรั่ง

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งและสตาร์ชจากถั่วหรั่ง (ตารางที่ 4.3) พบว่าแป้งถั่วหรั่งมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงถึงร้อยละ 58.38 ปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า และเยื่อใย เท่ากับร้อยละ 15.48 7.9 4.19 และ 2.54 (โดยน้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ โดยปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่วิเคราะห์ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Duke และคณะ (1986); Amarteifio และ Moholo (1998) ถั่วหรั่งเป็นแป้งประเภทถั่วซึ่งจะมีปริมาณโปรตีนสูงกว่าแป้งที่ได้จากธัญญพืช และพืชจากราก (Adebowale, *et al.*, 2002) แต่เมื่อเปรียบเทียบปริมาณโปรตีนของแป้งถั่วหรั่ง กับโปรตีนจากแป้งถั่วเขียวและ แป้งถั่วเหลือง พบว่าโปรตีนของแป้งถั่วหรั่งมีปริมาณน้อยกว่าปริมาณโปรตีนของแป้งทั้งสอง ซึ่งมีเท่ากับร้อยละ 26.37 และ 50 ตามลำดับ แต่จะมีปริมาณไขมันสูงกว่าแป้งจากถั่วเขียวและแป้งถั่วเหลือง ซึ่งมีเท่ากับร้อยละ 1.1 และ 2 (Amarteifio and Moholo, 1998; Padilla, *et al.*, 1996) องค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างของสายพันธุ์ของถั่ว จากการที่แป้งถั่วหรั่งมีปริมาณโปรตีนและไขมันสูงจะส่งผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของแป้งโดยไขมันที่รวมอยู่ในเม็ดแป้งจะลดความสารถในการพองตัว การละลาย และการจับตัวกันของแป้ง กรดไขมันอิ่มตัวซึ่งอยู่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้ง จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้แป้งเกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ ส่วนโปรตีนที่เกาะอยู่บริเวณผิวของเม็ดแป้ง จะทำให้เกิดประจุบนพื้นผิวเม็ดแป้ง มีผลต่อการกระจายตัวของเม็ดแป้ง ทำให้แป้งมีอัตราการดูดซับน้ำ อัตราการพองตัว และอัตราการเกิดเจลาทิไนซ์เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ยังทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard

reaction) ระหว่างกรดอะมิโนกับน้ำตาลรีดิวซิง มีผลทำให้สีและกลิ่นของแป้งเปลี่ยนแปลงไป (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปียะจอมขวัญ , 2546)

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วหรั่ง พบว่าปริมาณคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เถ้า เยื่อใย และความชื้น เท่ากับร้อยละ 88.98 0.61 0.44 0.47 0.53 และ 8.90 (โดยน้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ ซึ่งสตาร์ชถั่วหรั่งที่ผลิตได้นี้มีความบริสุทธิ์สูง สามารถนำไปใช้ในการศึกษาสมบัติทางโครงสร้าง และสมบัติเชิงหน้าที่ในตอนต่อไป (หัวข้อ 4.3 และ 4.4) และจากการทดลองพบว่าสตาร์ชถั่วหรั่งที่ผลิตได้ มีปริมาณโปรตีน และความชื้นต่ำกว่า แต่มีปริมาณไขมัน และเถ้าที่สูงกว่าสตาร์ชถั่วหรั่งที่ผลิตโดย Adebowale และคณะ (2002) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของวิธีการผลิตสตาร์ชกล่าวคือในการทดลองครั้งนี้ใช้เวลาในการแช่สารละลายแป้งเพียง 4 ชั่วโมง ซึ่งต่างจากงานวิจัยของ Adebowale และคณะ (2002)ที่ใช้เวลาในการแช่สารละลายแป้งทั้งสิ้นนานถึง 29 ชั่วโมง ส่งผลให้ปริมาณไขมัน และเถ้ามีปริมาณที่ต่ำมาก นอกจากนี้ในการทดลองยังใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงกว่า คือ 0.3 % (w/v) จึงส่งผลให้สตาร์ชที่ผลิตได้มีปริมาณโปรตีนที่ต่ำกว่า จากการวิเคราะห์หาปริมาณอะไมโลสจากสตาร์ชถั่วหรั่งด้วยวิธี Colorimetric method หรือ Iodine method โดยการวัดค่าสีที่เกิดขึ้น พบว่าสตาร์ชถั่วหรั่งมีปริมาณาอะมิโลสร้อยละ 14.98

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งและสตาร์ชจากถั่วหรั่ง

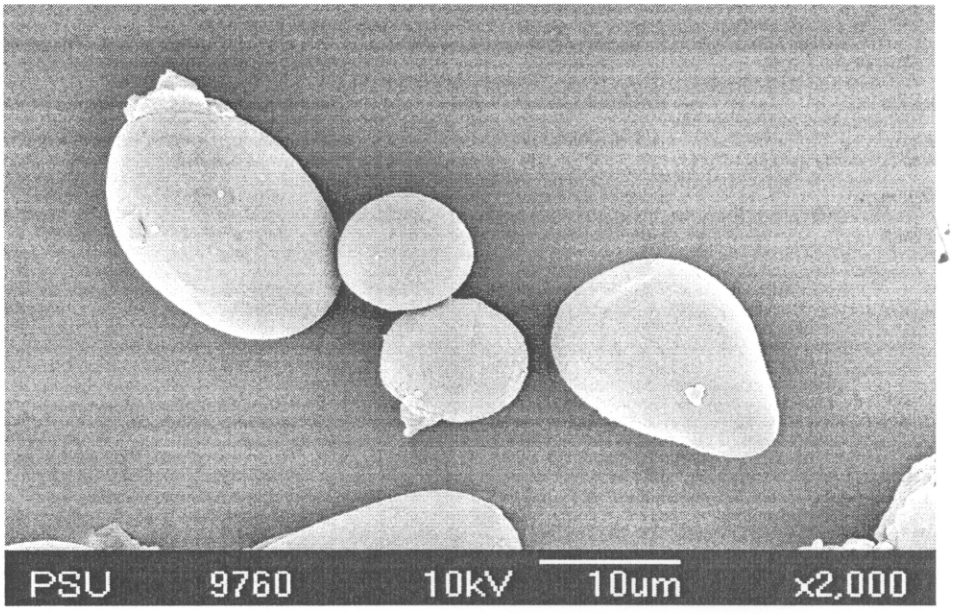
องค์ประกอบ*	ปริมาณ (% db)	
	แป้งถั่วหรั่ง	สตาร์ชถั่วหรั่ง
ความชื้น	11.51±0.32	8.90±0.18
ไขมัน	7.90±0.01	0.44±0.05
โปรตีน	15.48±0.18	0.61±0.08
เถ้า	4.19±0.03	0.47±0.03
เยื่อใย	2.54±0.38	0.60±0.08
คาร์โบไฮเดรต	61.59±0.86	88.98±0.23
ปริมาณอะมิโลส	ND	21.67±1.43

* ทำการทดลอง 3 ซ้ำ; ND = ไม่ได้ตรวจวัด

4.3 สมบัติทางโครงสร้างของสตาร์ชถั่วหรั่ง

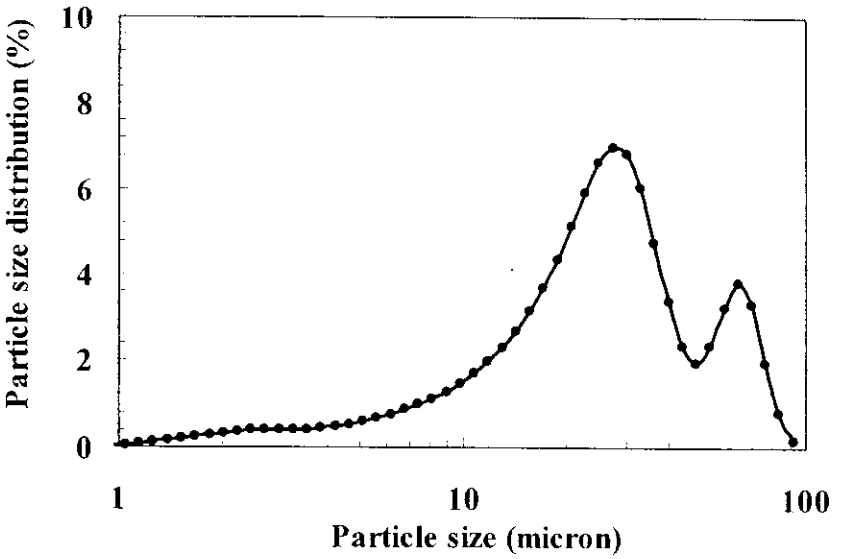
4.3.1 รูปร่าง ขนาด และการกระจายตัวของขนาดของเม็ดสตาร์ชถั่วหรั่ง

สตาร์ชที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดสตาร์ช (granule) ขนาดเล็ก โดยเมื่อตรวจดูลักษณะของเม็ดสตาร์ชชนิดต่างๆด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็คตรอน (Scanning Electron Microscope) พบว่าเม็ดสตาร์ชมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งของสตาร์ชนั้นๆ เมื่อตรวจดูลักษณะของเม็ดสตาร์ชถั่วหรั่ง พบว่าเม็ดสตาร์ชถั่วหรั่งมีรูปร่างเป็นวงรี ทรงกลม และแบบมีรอยเว้า แสดงดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชถั่วหรั่งที่ทำการตรวจวัดด้วย Scanning electron micrographs (SEM) ที่กำลังขยาย 2000

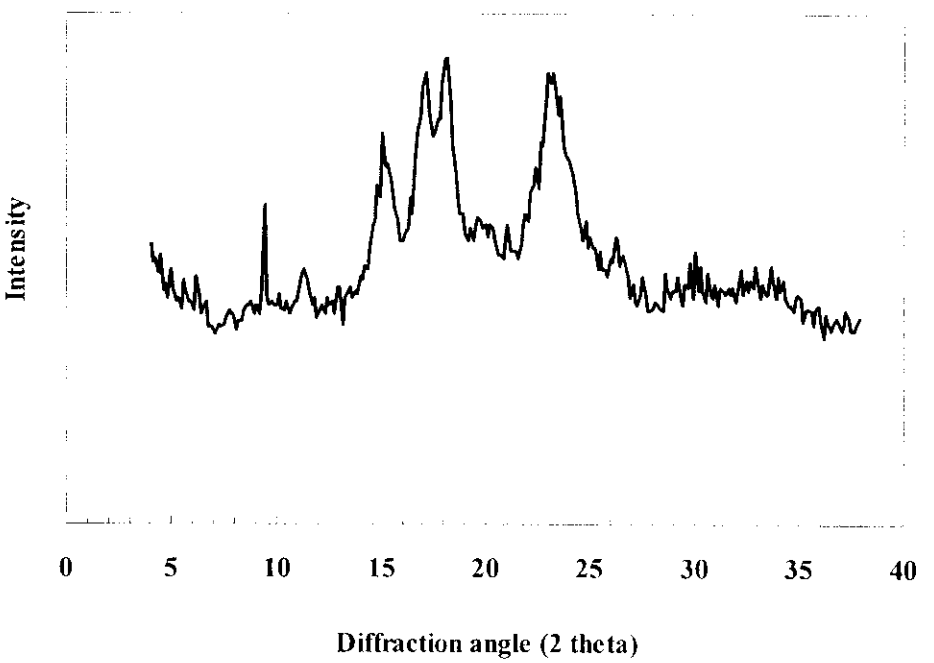
เมื่อตรวจวัดขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ช (ภาพที่ 4.3) โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer พบว่าเม็ดสตาร์ชถั่วหรั่งมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 30.39 ไมโครเมตร เมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดเฉลี่ยของสตาร์ชถั่วหรั่ง กับสตาร์ชถั่วเขียว และสตาร์ชข้าวเจ้า พบว่าสตาร์ชถั่วหรั่งมีขนาดเม็ดสตาร์ชที่ใหญ่กว่าสตาร์ชทั้งสองชนิด แต่เม็ดสตาร์ชถั่วหรั่งมีขนาดในช่วงเดียวกับเม็ดสตาร์ชข้าวบาร์เลย์ นอกจากนี้พบว่าเม็ดสตาร์ชถั่วหรั่งยังมีคงรูปร่างสมบูรณ์ ไม่มีการแตกหักซึ่งบ่งบอกถึงกระบวนการผลิตสตาร์ชถั่วหรั่งในการทดลองนี้ไม่ทำให้เม็ดสตาร์ชได้รับความเสียหาย



ภาพที่ 4.3 ขนาด และการกระจายตัวของขนาดเม็ดสตาร์ชถั่วหรั่ง

4.3.2 ลักษณะโครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วหรั่ง

จากการศึกษารูปแบบการหักเหรังสีเอ็กซเรย์ของสตาร์ชถั่วหรั่ง พบว่าโครงสร้างผลึก (crystallininity) ของเม็ดสตาร์ชมีการเรียงตัวแบบ A (ภาพที่ 4.4) และพบว่าปริมาณผลึกของสตาร์ชถั่ว หรั่งเท่ากับร้อยละ 43.69 โดยทั่วไปสตาร์ชจากพืชตระกูลถั่วมีรูปแบบการจัดเรียงผลึกแบบ C ซึ่งเป็นลักษณะรวมกันระหว่างผลึกแบบ A และ B ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าสตาร์ชถั่วหรั่งมีความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่มากกว่าสตาร์ชจากพืชตระกูลถั่วทั่วไป จึงเกิดโครงสร้างผลึกแบบ A



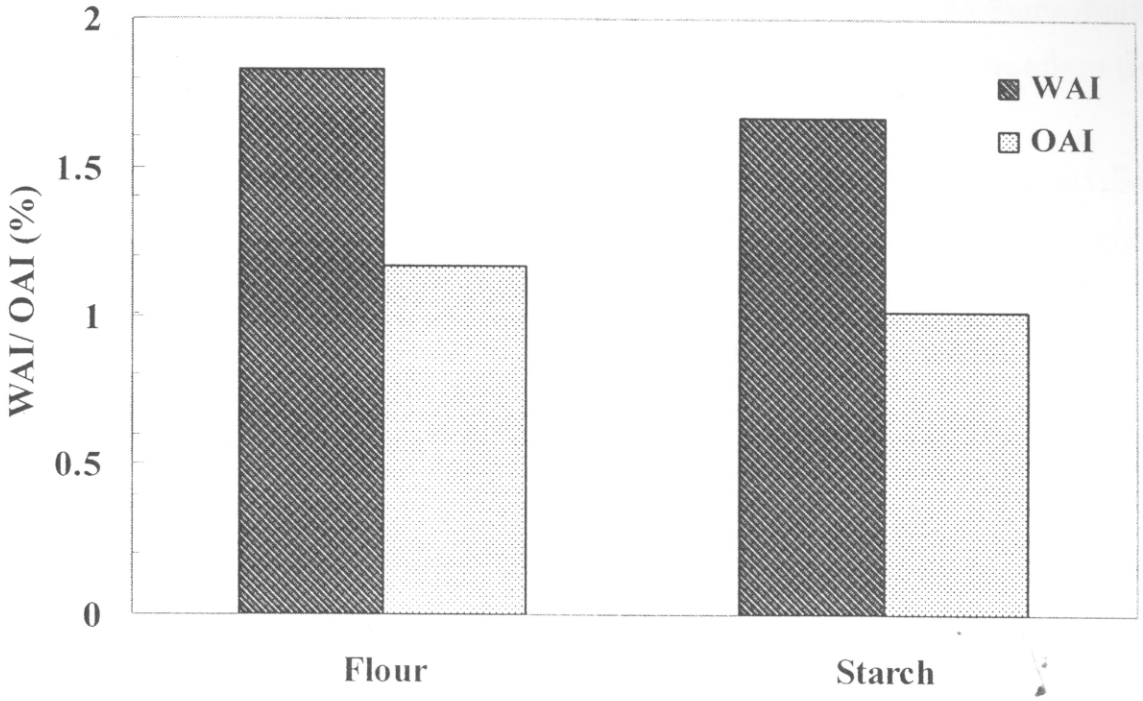
ภาพที่ 4.4 รูปแบบการหักเหรังสีเอ็กซเรย์ของสตาร์ชถั่วหรั่ง

4.4 สมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งและสตาร์ชจากถั่วหรั่ง

4.4.1 ความสามารถในการดูดซับน้ำและน้ำมันของแป้งและสตาร์ชจากถั่วหรั่ง

จากการศึกษาพบว่าแป้งถั่วหรั่งมีความสามารถในการดูดซับน้ำ (water absorption capacity) เท่ากับ 1.83 มิลลิลิตรต่อกรัม (ภาพที่ 4.5) ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของแป้งถั่วหรั่งจากการทดลองของ Adebowale และ Lawal (2004); Adevowale และคณะ(2002) ทั้งนี้อาจเนื่องจากสายพันธุ์ หรือแหล่งปลูกถั่วหรั่งมีความแตกต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับน้ำของแป้งถั่วหรั่งกับแป้งถั่วชนิดอื่นๆ พบว่าแป้งจากถั่วหรั่งมีความสามารถในการดูดซับน้ำต่ำกว่าแป้งถั่วมูคูนา (mucuna bean) และแป้งถั่วแจ็ค (jack bean) ซึ่งความสามารถในการดูดซับน้ำเท่ากับ 5.06 และ 2.3 มิลลิลิตรต่อกรัม ตามลำดับ (Adevowale and Lawal, 2004) การที่แป้งแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดซับน้ำแตกต่างกันนั้น เนื่องจากความแตกต่างของโครงสร้างโปรตีน (protein structure) และความแตกต่างของสายโมเลกุลของคาร์โบไฮเดรตที่ชอบน้ำ (hydrophilic carbohydrate) (Padilla, *et al.*, 1996) สำหรับการดูดซับน้ำมัน (oil absorption capacity) พบว่าแป้งถั่วหรั่งมีความสามารถในการดูดซับน้ำมันเท่ากับ 1.17 มิลลิลิตรต่อกรัม ซึ่งมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Adevowale และคณะ (2002); Adevowale และ Lawal (2004) แป้งถั่วหรั่งมีความสามารถในการดูดซับน้ำมันเนื่องจากมีสายโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ (non-polar sidechains) โดนส่วนใหญ่เป็นกรดอะมิโนที่ไม่มีขั้ว (non-polar amino acid) ในองค์ประกอบของแป้งถั่วหรั่ง จึงสามารถจับกับน้ำมันได้ (Padilla, *et al.*, 1996) ซึ่งการดูดซับน้ำมันของแป้งถั่วหรั่งมีผลต่อการเก็บรักษากลิ่นรสของอาหาร และช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของผลิต ภัณฑ์ขนมอบ หรือ ผลิตภัณฑ์จากเนื้อที่มีไขมันเป็นองค์ประกอบ

จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำและน้ำมันของสตาร์ชถั่วหรั่ง (ภาพที่ 4.5) พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับน้ำและการดูดซับน้ำมันของสตาร์ชถั่วหรั่งมีค่าเท่ากับ 1.67 และ 1.01 มิลลิลิตรต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งพบว่ามีค่าต่ำกว่าของแป้งถั่วหรั่ง โดยมีค่าสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Adebowale และคณะ (2002) ทั้งเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วหรั่งมีปริมาณโปรตีนทั้งที่ชอบและไม่ชอบน้ำต่ำกว่าของแป้งถั่วหรั่ง แสดงดังตารางที่ 4.3



ภาพที่ 4.5 ความสามารถในการดูดซับน้ำและน้ำมันของแป้งและสตาร์ชจากถั่วหรั่ง

4.4.2 ความสามารถในการละลายของโปรตีนของแป้งถั่วหรั่ง

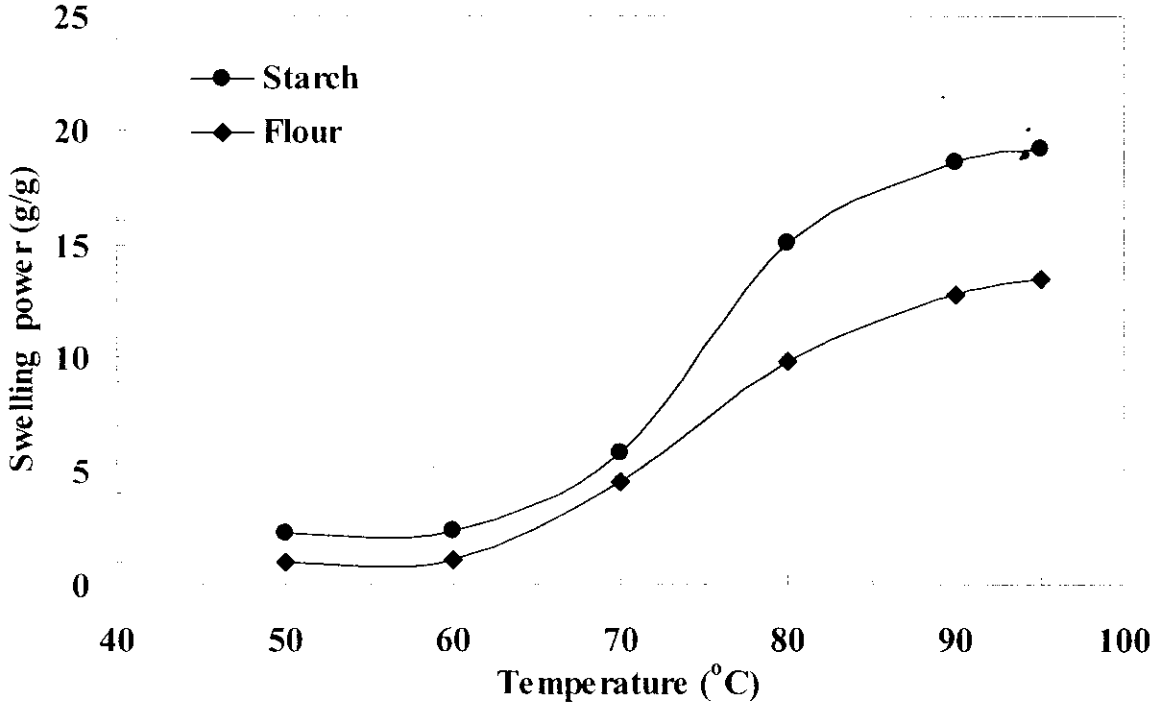
จากผลการทดลอง พบว่าค่าความสามารถในการละลายของโปรตีนของแป้งถั่วหรั่งเท่ากับร้อยละ 37.96 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าผลการศึกษาของ Adebowale และ Lawal (2004) ซึ่งพบว่าแป้งถั่วหรั่งมีค่าความสามารถในการละลายของโปรตีนเท่ากับร้อยละ 43.6 ทั้งนี้อาจเนื่องจากความแตกต่างของสายพันธุ์หรือแหล่งเพาะปลูก เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งถั่วชนิดอื่น ๆ พบว่าแป้งถั่วหรั่งมีค่าความสามารถในการละลายของโปรตีนต่ำกว่าแป้งถั่วมูคูนา (mucuna bean) และแป้งถั่วแจ็ค (jack bean) ทั้งนี้เนื่องจากแป้งจากถั่วทั้ง 2 ชนิดมีปริมาณโปรตีนสูงกว่าแป้งถั่วหรั่ง

4.4.3 กำลังการพองตัวของสตาร์ชถั่วหรั่ง

จากการศึกษากำลังการพองตัวของสตาร์ชและแป้งจากถั่วหรั่งที่อุณหภูมิ 50, 60, 70, 80 90 และ95องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชและแป้งจากถั่วหรั่งก็มีค่าเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.6 โดยสตาร์ชและแป้งจากถั่วหรั่งมีกำลังการพองตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 95°C เท่ากับ 18.97 และ 13.83 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนแก่สตาร์ชและแป้งถั่วหรั่งที่อุณหภูมิสูงขึ้น โมเลกุลของเม็ดสตาร์ชที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดสตาร์ชจึงเกิดการพองตัว รูปแบบกำลังการพองตัวของสตาร์ชถั่วหรั่งเป็นแบบ 2 ขั้นตอน (two-stage swelling pattern) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของอันตรกิริยาภายในเม็ดสตาร์ช โดยในช่วงเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส สตาร์ชมีค่ากำลังการพองตัวต่ำ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส ค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้อง

กับรูปแบบการพองตัวของสตาร์ชถั่วเขียว (Chen และคณะ, 2003) และสตาร์ชจากธัญพืช ซึ่งแสดงถึงแรงของพันธะในเม็ดสตาร์ชที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ พันธะบริเวณผลึกและบริเวณอสัญฐาน ของเม็ดสตาร์ช ซึ่งจะคลายตัวที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

จากการเปรียบเทียบกำลังการพองตัวของสตาร์ชและแป้งจากถั่วหรั่ง พบว่าแป้งถั่วหรั่งมีค่ากำลังการพองตัวต่ำกว่าของสตาร์ชถั่วหรั่ง ทั้งนี้เนื่องจากในแป้งถั่วหรั่งมีสิ่งเจือปนภายในเม็ดสตาร์ชที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ได้แก่โปรตีน และไขมันที่สูง ดังตารางที่ 4.3 (Leach, 1965) ซึ่งส่งเสริมโครงสร้างของสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้น ทำให้ความสามารถในการพองตัวลดต่ำลง (Delpeuch and Favier, 1980 อ้างโดย Chen, *et al.*, 2003)

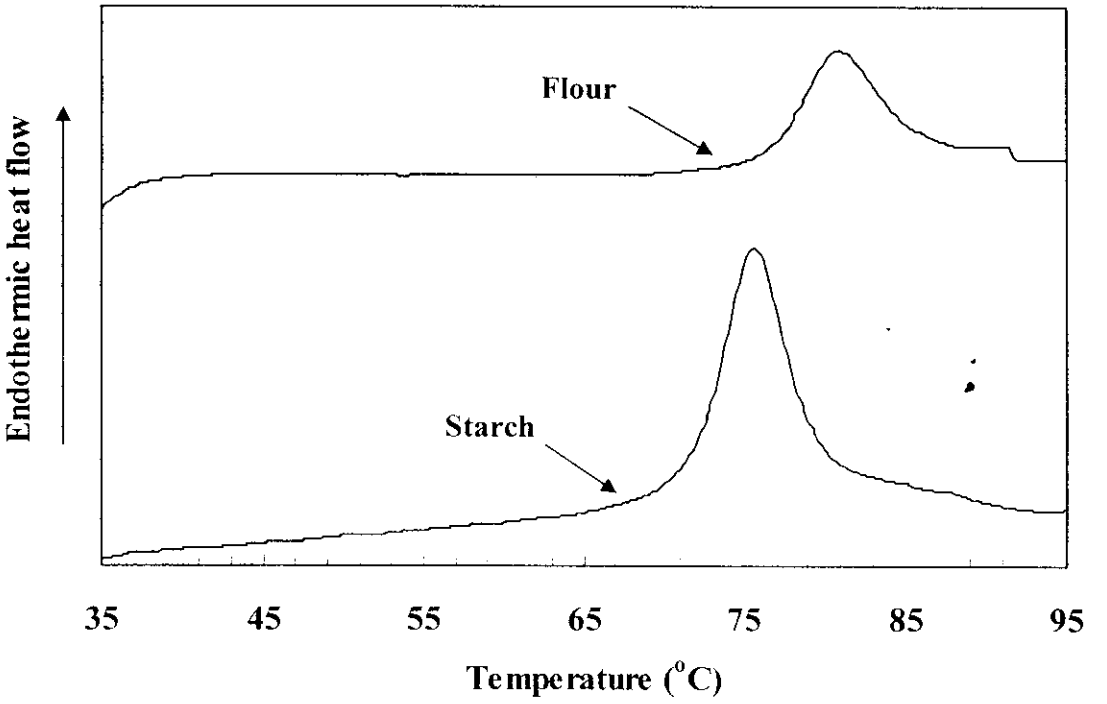


ภาพที่ 4.6 รูปแบบกำลังการพองตัวของสตาร์ชและแป้งจากถั่วหรั่งที่อุณหภูมิต่างๆ

4.4.4 การเกิดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ชและแป้งจากถั่วหรั่ง

จากการศึกษาสมบัติการเกิดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ชและแป้งจากถั่วหรั่งด้วยเครื่อง Differential Scanning Colorimeter (DSC) พบว่าทั้งสตาร์ชและแป้งจากถั่วหรั่งมีการดูดความร้อนแบบ monophasic (ภาพที่ 4.7) โดยแป้งถั่วหรั่งมีอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลาติไนเซชัน (T_o) สูงกว่า แต่มีค่าเอนทัลปีการเกิดเจลาติไนเซชัน (ΔH) ต่ำกว่าสตาร์ชถั่วหรั่ง แสดงดังตารางที่ 4.4 ทั้งนี้เนื่องจากแป้งถั่วหรั่งประกอบด้วยโปรตีนและไขมันสูง ซึ่งส่งเสริมโครงสร้างของสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้น ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าในการหลอมละลายโครงสร้างของโมเลกุล (Czuchajowska และคณะ, 1998) และเมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนกับสตาร์ชชนิดอื่น พบว่า สตาร์ชถั่วหรั่งมีค่า ΔH สูงกว่าสตาร์ช

ถั่วเขียว (Chung *et al.*, 2000) แต่มีค่าต่ำกว่าสตาร์ชข้าวเจ้า (Noosuk *et al.*, 2003) แสดงให้เห็นว่าสตาร์ชถั่วหรั่งมีโครงสร้างที่หนาแน่นและแข็งแรงกว่าสตาร์ชถั่วเขียว จึงต้องใช้พลังงานความร้อนที่สูงกว่าในการทำลายอันตรกิริยาภายในโมเลกุลของเม็ดสตาร์ช แต่อย่างไรก็ตามพบว่ามีโครงสร้างที่หนาแน่นและแข็งแรงน้อยสตาร์ชข้าวเจ้า จึงใช้พลังงานความร้อนต่ำกว่าในการทำลายอันตรกิริยาภายในโมเลกุลของเม็ดสตาร์ช



ภาพที่ 4.7 เทอร์โมแกรมการเกิดเจลาทีไนเซชันของสตาร์ชและแป้งจากถั่วหรั่ง

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์การเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชและแป้งจากถั่วหรั่ง

ตัวอย่าง	T_0(°C)*	T_p(°C)*	T_c(°C)*	$T_c - T_0$*	ΔH (J/g)*
สตาร์ช	71.69±0.10	75.33±0.29	79.17±0.45	7.48	11.73±1.15
แป้ง	76.84±0.12	80.75±0.23	85.82±0.40	9.0	6.00±1.10

* ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

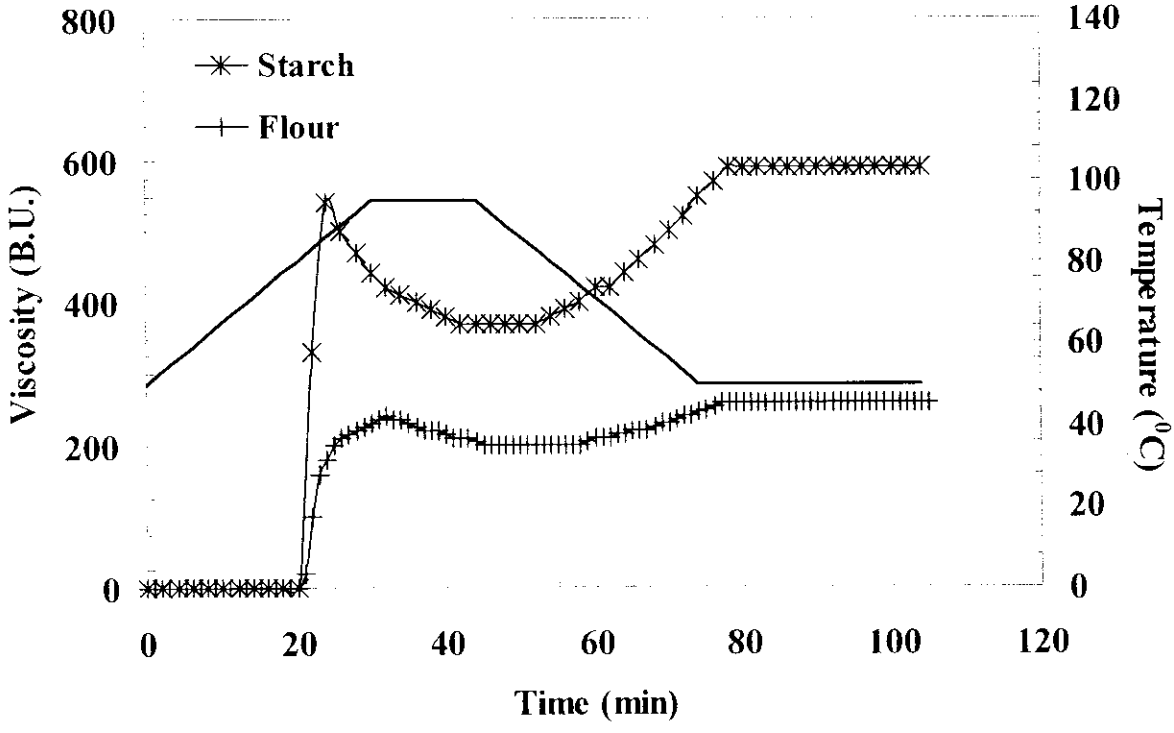
4.4.5 สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชและแป้งจากถั่วหรั่ง

4.4.5.1 ผลของ pH ต่อพฤติกรรมทางความหนืดของสตาร์ชและแป้งจากถั่วหรั่ง

จากการเปรียบเทียบผลของ pH ต่อพฤติกรรมทางความหนืดของสตาร์ชถั่วหรั่งความเข้มข้นร้อยละ 6 (ภาพที่ 4.8) พบว่าสตาร์ชถั่วหรั่งสามารถทนต่อสภาวะความเป็นกรดได้จนถึง pH

4.6 โดยค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และค่า breakdown ในช่วง pH 4.6 ถึง 7.0 ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความคงตัวต่อการให้ความร้อนของเม็ดสตาร์ช มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) แสดงดังตารางที่ 4.5 แต่เมื่อ pH ของสตาร์ชลดต่ำลงเป็น 3.6 พบว่าค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส มีค่าลดต่ำลง แต่มีค่า breakdown เพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากกรดเข้าไปทำลายพันธะของสายโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ช ส่งผลให้ความแข็งแรงของเม็ดสตาร์ชลดลง เมื่อพิจารณาค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และค่า setback ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโมเลกุลอะมิโลสที่หลุดออกจากเม็ดสตาร์ชที่แตกตัว พบว่าสตาร์ชถั่วหรั่งที่ pH 3.6 มีค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และค่า setback ลดต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากสายโมเลกุลของอะมิโลสถูกทำลายด้วยสภาวะกรด ทำให้ความสามารถในการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโมเลกุลเกิดได้น้อยลง

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชและแป้งจากถั่วหรั่ง ที่ pH 7.0 พบว่าแป้งถั่วหรั่งมีค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และค่า breakdown ต่ำกว่าของสตาร์ชถั่วหรั่งมาก ซึ่งแสดงถึงความคงตัวต่อความร้อนของแป้งถั่วหรั่งมีค่าสูง เนื่องจากในแป้งถั่วหรั่งมีสิ่งเจือปนภายในเม็ดสตาร์ช ได้แก่ โปรตีน และไขมันที่สูง ซึ่งสามารถเกิดอันตรกริยากับเม็ดสตาร์ชระหว่างที่ได้รับความร้อน ส่งผลให้โครงสร้างของสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้น (Gujska และคณะ, 1994)



ภาพที่ 4.8 ลักษณะกราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชและแป้งจากถั่วหรั่งที่ pH 7.0

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ทางความหนืดของสตาร์ชและแป้งจากถั่วหรั่งที่ pH ต่าง ๆ

พารามิเตอร์	สตาร์ชถั่วหรั่ง				แป้งถั่วหรั่ง
	pH 3.6	pH 4.6	pH 5.6	pH 7.0	pH 7.0
Onset pasting temperature (^{O}C)	76.4[a]	76.8[a]	77.3[b]	77.7[b]	80.5[c]
Peak viscosity (BU) (P)	565[ab]	575[a]	570[ab]	545[b]	243[a]
Viscosity (BU)					
- at 95 ^{O}C hold (H)	275[a]	365[b]	395[b]	375[b]	205[a]
- at 50 ^{O}C (C)	430[a]	585[b]	600[b]	595[b]	202[a]
Breakdown (BU) (P-H)	290[a]	210[b]	175[b]	170[b]	38[a]
Setback (BU) (C-H)	155[a]	220[b]	205[b]	220[b]	57[a]

ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าในแถวที่มีตัวอักษรแตกต่างกันแสดงว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p< 0.05$)

เมื่อทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมทางความหนืดของสตาร์ชถั่วหรั่ง กับสตาร์ชถั่วเขียวที่ pH 7.0 พบว่าสตาร์ชถั่วเขียวมีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (onset pasting temperature) ใกล้เคียงกับสตาร์ชถั่วหรั่ง แต่มีค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสที่ต่ำกว่า และไม่พบค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) และค่า breakdown แสดงให้เห็นว่าสตาร์ชถั่วเขียวมีการพองตัวต่ำกว่า และมีความคงตัวต่อความร้อนสูงกว่าสตาร์ชถั่วหรั่ง นอกจากนั้นพบว่าสตาร์ชถั่วหรั่งมีค่า setback ต่ำกว่าสตาร์ชถั่วเขียว แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโมเลกุลอะมิโลสของสตาร์ชถั่วหรั่งเกิดได้น้อยกว่าสตาร์ชถั่วเขียว

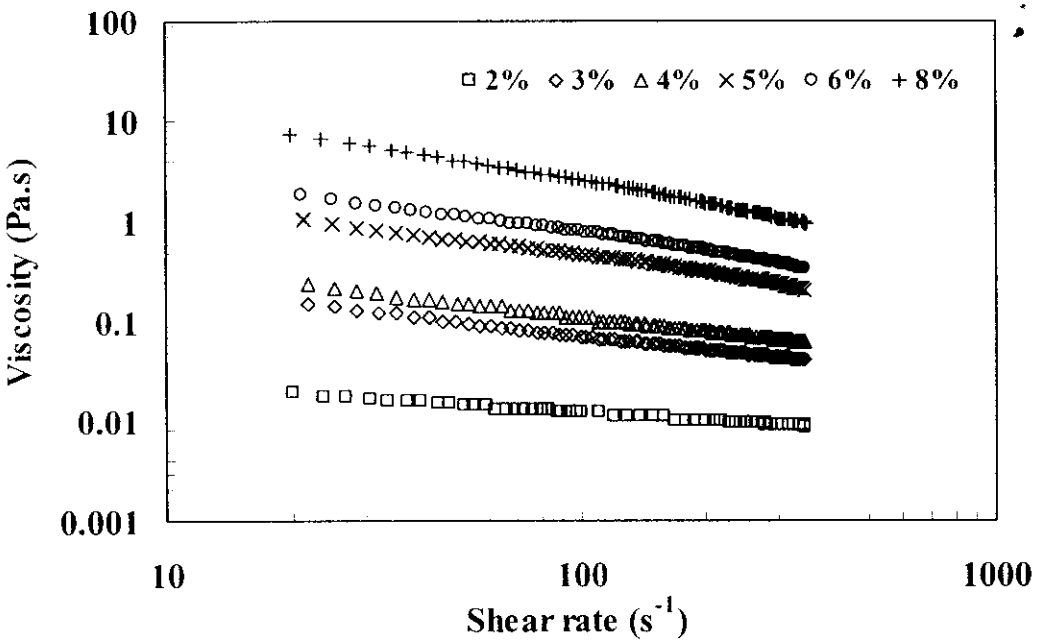
4.4.5.2 ผลของความเข้มข้นของสตาร์ชถั่วหรั่งต่อพฤติกรรมทางความหนืด

ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของสตาร์ชถั่วหรั่ง ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน (2% - 8%) ทำการวัดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ในช่วงอัตราการเฉือนเท่ากับ 20-400 s^{-1} จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือนของสตาร์ชถั่วหรั่งทั้ง 3 ชนิด พบว่าเป็นไปตามกฎสมการยกกำลัง (power law equation) ดังสมการที่ (4.1) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในระดับสูง (R^2=0.99, $p\leq$0.05)

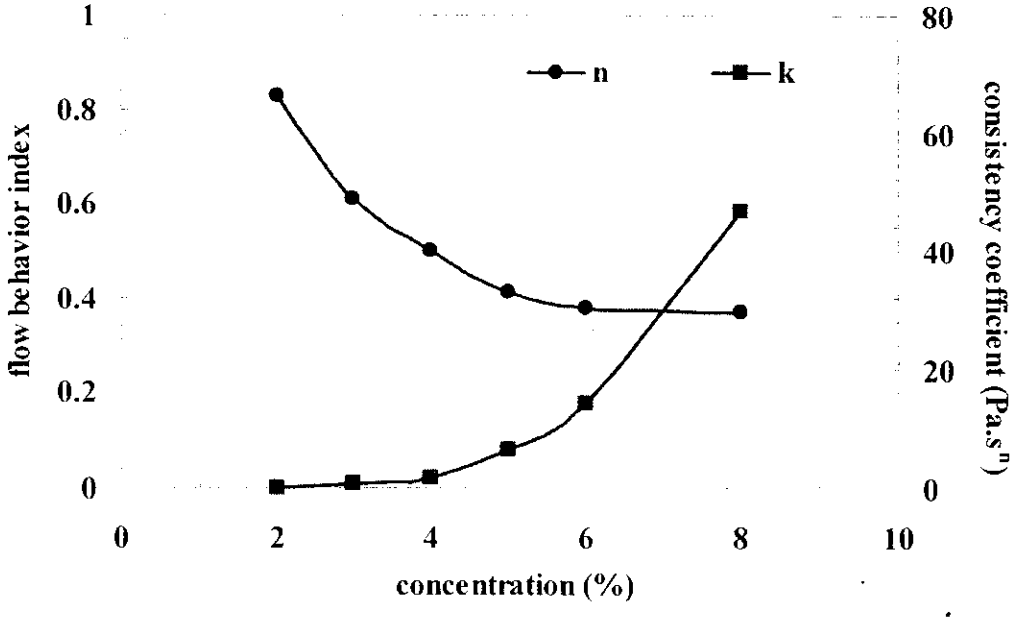
$$\sigma = k\dot{\gamma}^{n} \qquad (4.1)$$

เมื่อ σ คือความเค้นเฉือน (Pa), $\dot{\gamma}$ คืออัตราการเฉือน (s^{-1}), K คือค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว (consistency coefficient) ($Pa.s^{n}$) และ n คือดรรชนีพฤติกรรมการไหล (flow behavior index)

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความหนืดปรากฏและความเค้นเฉือนของสตาร์ชถั่วหรั่งที่ทุกระดับความเข้มข้น พบว่าความหนืดปรากฏมีค่าลดลงเมื่ออัตราการเฉือนเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 4.9) และเมื่อพิจารณค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล (n) พบว่ามีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าสตาร์ชถั่วหรั่งมีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก (pseudoplastic) หรือ แบบ shear thinnning (Noel *et al.*, 1993) และพบว่าเมื่อความเข้มข้นสตาร์ชถั่วหรั่งมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความหนืดปรากฏและค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว (K) มีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่ n มีค่าลดลง ซึ่งแสดงพฤติกรรมความเป็นซูโดพลาสติกเพิ่มมากขึ้น นอกจากนั้นพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสตาร์ชถั่วหรั่งสูงกว่าร้อยละ 4 ค่า n มีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่ (n = 0.38) ขณะที่ K มีค่าเพิ่มสูงขึ้นมาก แสดงดังภาพที่ 4.10 ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสตาร์ชเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การเกิดอันตรกริยาระหว่างสายโมเลกุลของอะมิโลส กับเม็ดสตาร์ช (amylose-granule interaction) และอันตรกริยาระหว่างเม็ดสตาร์ช (granule-granule interaction) สามารถเกิดได้มากขึ้น (Clark and Ross-Murphy, 1987)



ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของค่าความหนืดปรากฏกับอัตราการเฉือนของสตาร์ชถั่วหรั่งที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ทำการวัดด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ ที่อุณหภูมิ 60 °C ที่ช่วงอัตราการเฉือน 20-400 s^{-1}



ภาพที่ 4.10 อิทธิพลของความเข้มข้นต่อดัชนีพฤติกรรมการไหล (flow behavior index) และสัมประสิทธิ์ความคงตัว (consistency coefficient) ของสตาร์ชถั่วหรั่ง ซึ่งทำการศึกษาด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ ที่อุณหภูมิ 60 °C ที่ช่วงอัตราการเฉือน 20-400 s^{-1}

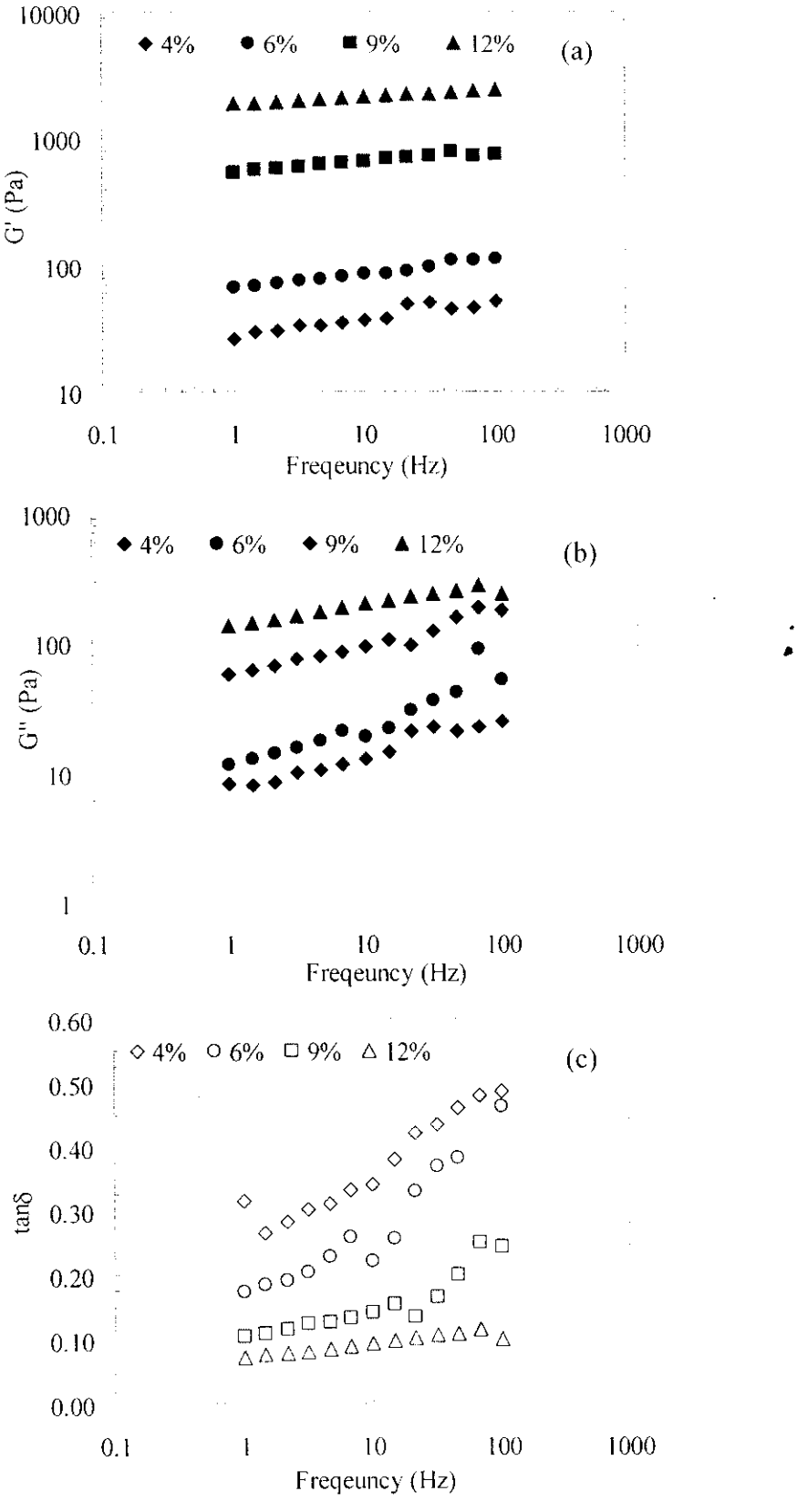
4.4.6 สมบัติวิสโคอีลาสติกของสตาร์ชถั่วหรั่ง

การวิเคราะห์สมบัติวิสโคอีลาสติกแบบการสั่นทางพลวัติ (dynamic oscillation) เป็นการวิเคราะห์การตอบสนองต่อความเค้น (stress) หรือความเครียด (strain) ภายใต้การเคลื่อนที่แบบสั่นของวัสดุวิสโคอีลาสติก โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ storage modulus (G'), loss modulus (G'') และ loss tangent (tan δ) ซึ่งค่า G' หมายถึงปริมาณพลังงานที่ถูกเก็บไว้ในวัสดุเมื่อได้รับความเค้นหรือความเครียด G'' หมายถึงพลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากความหนืด และค่า tan δ หมายถึงสัดส่วนของการแสดงสถานการณ์เป็นวัสดุไหลหนืดต่อสถานะยืดหยุ่น (G''/G')

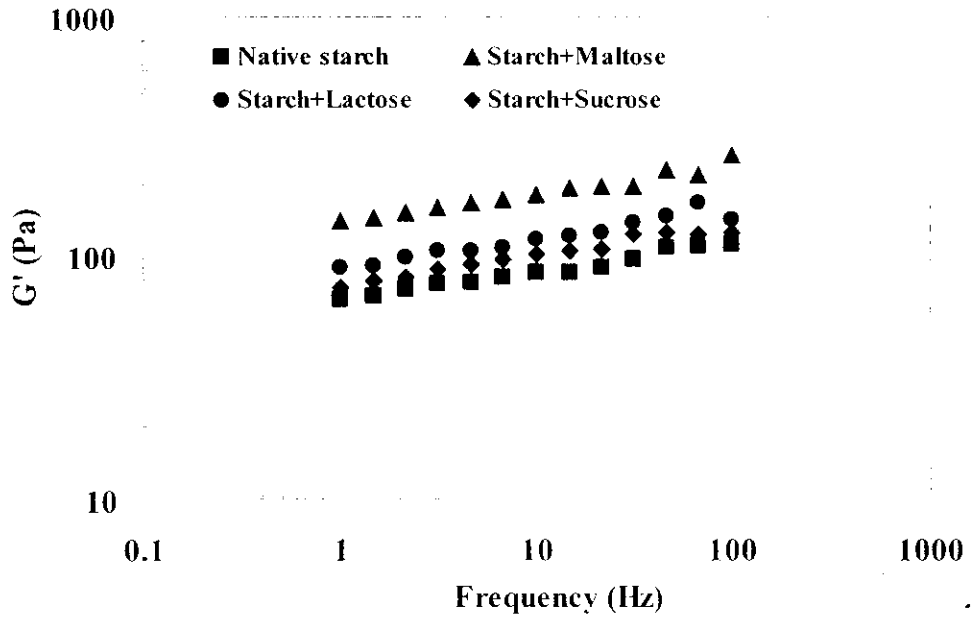
จากการวิเคราะห์สมบัติวิสโคอีลาสติกของสตาร์ชถั่วหรั่ง พบว่าค่า G' ของสตาร์ชถั่วหรั่งที่ทุกระดับความเข้มข้นและทุกค่าความถี่ (frequency) มีค่าสูงกว่าค่า G'' ดังภาพที่ 4.12 ซึ่งแสดงคุณลักษณะของเจล (Biliaderis *et al.*, 1992) เมื่อความเข้มข้นของสตาร์ชเพิ่มขึ้น พบว่าค่า G' เพิ่มสูงขึ้น ขณะที่ tanδ มีค่าลดลง ซึ่งแสดงว่าเจลของสตาร์ชถั่วหรั่งมีความแข็งแรงมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเข้มข้นของสตาร์ชสูง ส่งผลให้การเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโมเลกุลอะมิโลสกับเม็ดสตาร์ช (amylose-granule interaction) และการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเม็ดสตาร์ช (granule-granule interaction) เกิดได้มากขึ้น (Biliaderis and Julino, 1993; Lii *et al.*, 1995 and Tsai *et al.*, 1997) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่า G' กับค่าความถี่ พบว่าสตาร์ชถั่วหรั่งที่มีความเข้มข้นต่ำ (4% และ6%) ค่าG' มี

ค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความถี่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงคุณลักษณะของเจลที่มีความแข็งแรงน้อย (weak gel) ขณะที่เมื่อความเข้มข้นของสตาร์ชเพิ่มสูงขึ้น (9% และ12%) พบว่าค่า G' มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อค่าความถี่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงคุณลักษณะของเจลที่แข็งแรงขึ้น (strong gel) (Clark and Ross-Murphy, 1987)

จากการศึกษาผลของน้ำตาล 3 ชนิด คือ น้ำตาลมอลโตส, แล็คโตส และซูโครส ต่อความแข็งแรงของเจลสตาร์ชถั่วหรั่ง (ภาพที่ 4.12) พบว่าเจลของสตาร์ชที่เติมน้ำตาลมีค่า G' สูงกว่าสตาร์ชที่ไม่เติมน้ำตาล เนื่องจากน้ำตาลที่เติมลงไปสามารถเกิดอันตรกริยากับโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในเจลสตาร์ช ทำให้ความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้น และจากศึกษาเปรียบเทียบชนิดน้ำตาลต่อความแข็งแรงของเจล พบว่าเจลสตาร์ชถั่วหรั่งที่เติมน้ำตาลมอลโตสมีค่า G' สูงกว่าเจลสตาร์ชถั่วหรั่งที่เติมน้ำตาลแลคโตส และน้ำตาลซูโครส ตามลำดับ การที่น้ำตาลมอลโตสสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงของเจลสตาร์ชได้มากว่าน้ำตาลซูโครส และแลกโตสนั้น เนื่องจากน้ำตาลมอลโตสมีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลที่ตั้งฉากกับโครงสร้าง (equatorial hydroxyl groups) สูงถึง 7.2 ซึ่งสูงกว่าน้ำตาลอีก 2 ชนิด (Katsuta, *et al.*, 1992) จึงสามารถเกิดอันตรกริยากับโมเลกุลของน้ำในเจลสตาร์ชได้มากกว่า ซึ่งทำให้ความหนืดของน้ำในโครงสร้างมีค่าเพิ่มขึ้น การเคลื่อนที่ของสายโมเลกุลของสตาร์ชเกิดได้น้อยลง ส่งผลให้โครงสร้างของเจลแข็งแรงขึ้น (Ahmad และ Williams, 1999; I'Anson *et al.*, 1990; Prokopowich และ Billiaderis, 1995)



ภาพที่ 4.11 ผลของความถี่ต่อค่า G' (a), G'' (b) และ tanδ (c) ของสตาร์ชถั่วหรั่ง ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ซึ่งทำการศึกษาด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ ที่อุณหภูมิ 60 °C และความถี่ 1-100 Hz

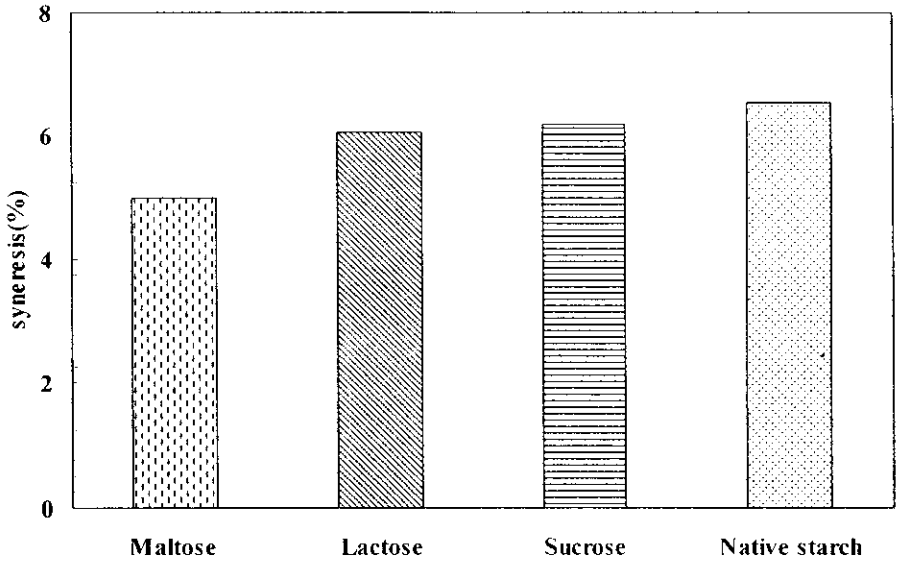


ภาพที่ 4.12 ผลของความถี่ต่อค่า G' ของสตาร์ชถั่วหรั่งความเข้มข้นร้อยละ6 (native starch) และสตาร์ชถั่วหรั่งที่เติมน้ำตาลมอลโตส (starch+maltose) น้ำตาลแลกโตส (starch+lactose) และน้ำตาลซูโครส (starch+sucrose) ซึ่งทำการศึกษาด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ที่อุณหภูมิ 60 °C และความถี่ 1-100 Hz

4.4.7 สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชถั่วหรั่ง

4.4.7.1 ความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งและการละลาย

จากการศึกษาผลของน้ำตาล 3 ชนิด คือ น้ำตาลมอลโตส น้ำตาลแล็คโตส และซูโครส ต่อความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งและการละลาย (ภาพที่ 4.13) พบว่าเจลสตาร์ชที่เติมน้ำตาลมอลโตสเกิดการสูญเสียน้ำ (syneresis) ระหว่างการแช่เยือกแข็งและการละลายน้อยที่สุด ซึ่งมีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำเท่ากับ 5.00 สำหรับเจลสตาร์ชที่เติมน้ำตาลแลคโตส และเจลสตาร์ชที่เติมน้ำตาลซูโครส พบว่าเกิดการสูญเสียน้ำระหว่างการแช่เยือกแข็งและการละลายใกล้เคียงกันคือร้อยละ 6.04 และ 6.17 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าการสูญเสียน้ำต่ำกว่าเจลสตาร์ชชุดควบคุม (ไม่เติมน้ำตาล) เพียงเล็กน้อย การที่น้ำตาลมอลโตสสามารถลดการสูญเสียน้ำออกจากเจลสตาร์ชได้มากกว่าน้ำตาลชนิดอื่นนั้น เนื่องมาจากมีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลที่ตั้งฉากกับโครงสร้าง (equatorial hydroxyl groups) มากกว่า (Katsuta, *et al.*, 1992) จึงทำให้สามารถเกิดอันตรกริยากับโมเลกุลของน้ำในเจลได้มาก ดังนั้นจึงสามารถลดการสูญเสียน้ำออกจากเจลได้มากกว่าน้ำตาลอีก 2 ชนิด



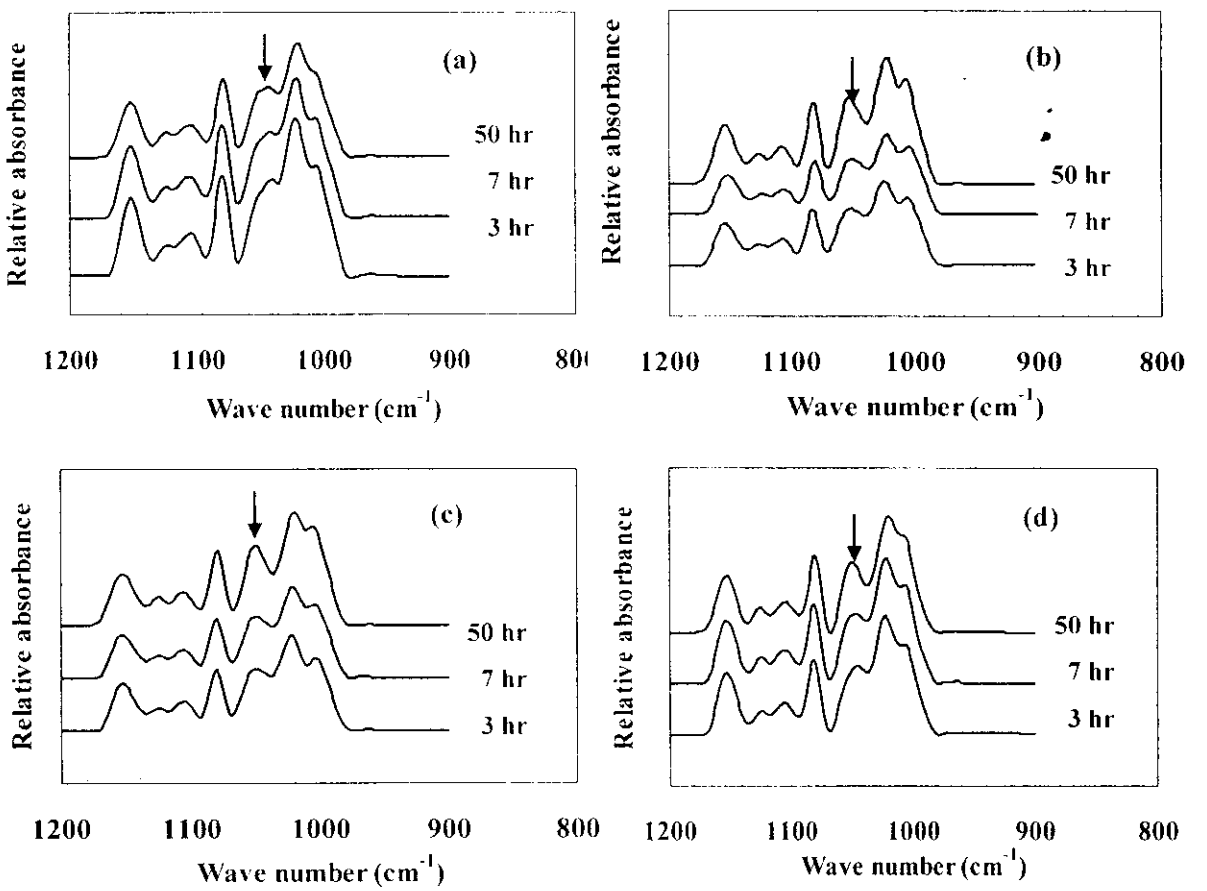
ภาพที่ 4.13 ร้อยละการสูญเสียน้ำ (% syneresis) ของเจลสตาร์ชถั่วหรั่งที่เติมน้ำตาลมอลโตส (maltose) น้ำตาลแลกโตส (lactose) และน้ำตาลซูโครส (sucrose) และเจลสตาร์ชที่ไม่เติมน้ำตาล (native starch)

4.4.7.2 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขณะเกิดรีโทรเกรเดชัน

การศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชถั่วหรั่ง ด้วยเครื่อง Fourier transform Infrared Spectoscopy (FT-IR) เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของปริมาณสายเกลียวคู่ต่ออสัณฐาน (ratio of short range molecular order to amorphous, RSA) โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงพีคการดูดกลืนแสงอินฟาเรดที่วัดการยืด (stretching) ของหมู่ C-C กับ C-O และการงอ (bending) ของหมู่ COH ในช่วงจำนวนคลื่น (wave nuber) 1300–800 cm^{-1} (Cael *et al.*, 1975) โดยพีคการดูดกลืนแสงที่ 1047 cm^{-1} มีความสัมพันธ์กับปริมาณสายเกลียวคู่หรือปริมาณผลึก และพีคการดูดกลืนแสงที่ 1022 cm^{-1} มีความสัมพันธ์กับส่วนอสัณฐานของสตาร์ช ดังนั้นอัตราส่วนของค่าการดูดกลืนแสงที่ 1047 ต่อ1022 cm^{-1} จึงแสดงถึงสัดส่วนของปริมาณสายเกลียวคู่ต่อส่วนอสัณฐาน (van Soet *et al.*, 1995) จากผลการทดลองการเก็บรักษาเจลของสตาร์ชถั่วหรั่งเป็นเวลานาน 50 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 4°C พบว่าพีคการดูดกลืนแสงอินฟาเรด (FT-IR spectra) ที่ 1047 cm^{-1} มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการเก็บรักษานานขึ้น (ภาพที่ 4.14d) ซึ่งแสดงถึงการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลเพิ่มขึ้น ในช่วงแรกของการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเนื่องมาจากสายโมเลกุลอะมิโลส ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นสามารถเคลื่อนที่เข้ามาจัดเรียงตัวกันใหม่ได้โดยง่ายโดยเหนี่ยวนำให้เกิดโครงสร้างสามมิติของเจลสตาร์ช จากนั้นการเปลี่ยนเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และเข้าสู่สมดุลซึ่งเป็นช่วงที่โครงสร้างผลึกเกิดการจัดเรียงตัวอย่างสมบูรณ์ (Goodfellow and Wilson, 1990; van Soet, 1994; Hoover, 2001)

จากการศึกษาผลของน้ำตาล 3 ชนิด คือ น้ำตาลมอลโตส น้ำตาลแล็คโตส และน้ำตาลซูโครสต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชถั่วหรั่ง พบว่าเจลสตาร์ชที่เติมน้ำตาลซูโครส และน้ำตาล

แลกโตสเกิดการเปลี่ยนแปลงพีคการดูดกลืนแสงอินฟาเรดที่ 1047 cm^{-1} ในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 50 ชั่วโมง (ภาพที่ 4.14b และ4.14c) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกับเจลสตาร์ชถั่ว หรั่งที่ไม่เติมน้ำตาล แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเจลของสตาร์ชถั่วหรั่งที่เติมน้ำตาลมอลโตสเกิดการเปลี่ยนแปลงพีคการดูดกลืนแสงอินฟาเรดที่ 1047 cm^{-1} ในระหว่างการเก็บรักษาเพียงเล็กน้อย (ภาพที่ 4.14a) แสดงถึงงงการเกิดรีโทรเกรเดชันได้เพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลที่ตั้งฉากกับโครงสร้าง (equatorial hydroxyl groups) ของน้ำตาลมอลโตสมีจำนวนสูงถึง 7.2 (Katsuta, *et al.*, 1992) จึงสามารถเกิดอันตรกริยากับโมเลกุลของน้ำในเจลสตาร์ชได้มากกว่าน้ำตาลชนิดอื่น ซึ่งทำให้ความหนืดของน้ำในโครงสร้างเจลเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ลดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสตาร์ช ดังนั้นจึงทำให้การกลับมาจัดเรียงตัวใหม่ของสายโมเลกุลสตาร์ชเกิดขึ้นได้ยาก (Ahmad และ Williams, 1999; I'Anson *et al.*, 1990; Prokopowich และ Billiaderis, 1995)



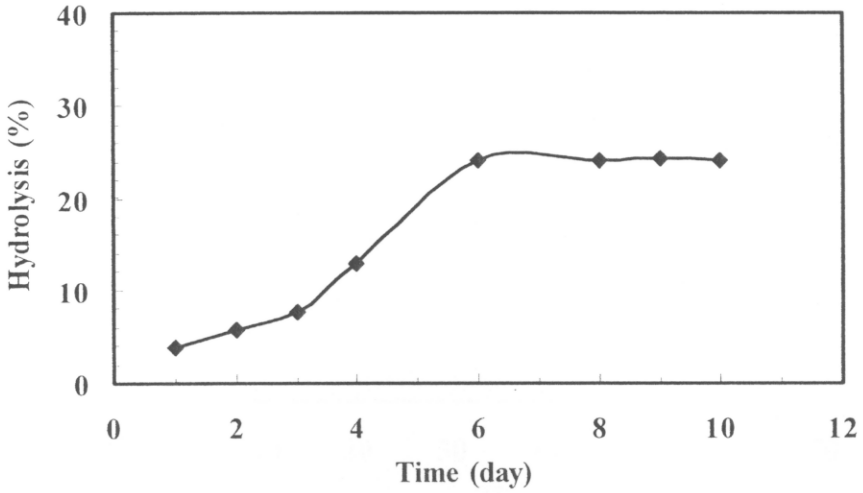
ภาพที่ 4.14 ลักษณะกราฟการดูดกลืนแสงที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR ของเจลสตาร์ชถั่วหรั่งที่เติมน้ำตาลมอลโตส (a) น้ำตาลแลกโตส (b) และน้ำตาลซูโครส (c) และเจลสตาร์ชถั่วหรั่งที่ไม่เติมน้ำตาล (d) ที่ระยะเวลาในการเก็บรักษาต่าง ๆ

4.4.8 ความสามารถในการถูกย่อยด้วยกรดของสตาร์ชถั่วหรั่ง

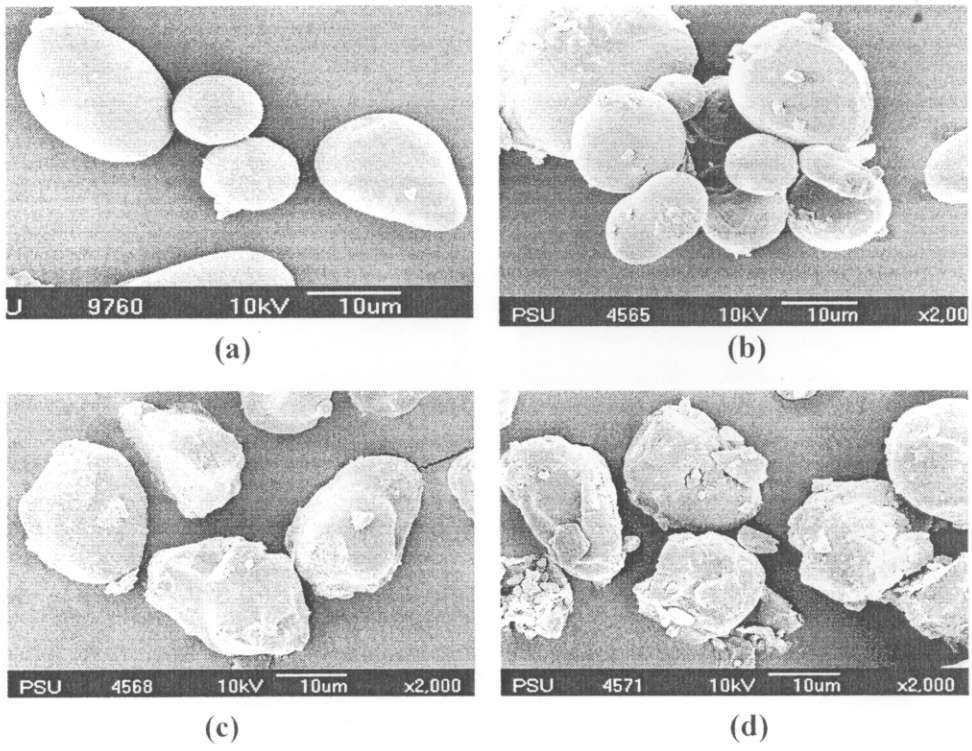
ความสามารถในการถูกย่อยด้วยกรด (ไฮโดรคลอลิก 2.2 โมล) ของสตาร์ชถั่วหรั่งแสดงดังภาพที่ 4.15 ซึ่งพบว่าสตาร์ชถั่วหรั่งมีรูปแบบการถูกย่อยด้วยกรดเป็นแบบ 2 ขั้นตอน(two-stage pattern) โดยเม็ดสตาร์ชถูกย่อยด้วยกรดอย่างรวดเร็วในช่วง 6 วันแรก จากนั้นการย่อยเป็นไปอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สภาวะสมดุล ในช่วง 6 – 10 วัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าในช่วงแรกของการย่อยนั้นกรดสามารถเข้าไปทำลายโครงสร้างในส่วนอสัญฐาน (amorphous) ซึ่งอยู่ใกล้กับบริเวณผิวหน้าของเม็ดสตาร์ชได้อย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นกรดจึงเข้าไปย่อยโครงสร้างในส่วนผลึก (crystalline) ซึ่งเป็นส่วนที่มีความแข็งแรง ดังนั้นการย่อยจึงเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สมดุล (Cairns *et al.*, 1990) สำหรับค่าความสามารถในการถูกย่อยด้วยกรดของสตาร์ชถั่วหรั่งเมื่อสิ้นสุดวันที่ 6 มีค่าเท่ากับร้อยละ 24.1 ซึ่งพบว่ามีค่าต่ำกว่าค่าความสามารถในการถูกย่อยด้วยกรดของถั่วชนิดอื่น ๆที่ศึกษาโดย Hoover และManuel (1996) ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชถั่วหรั่งมีความแข็งแรงกว่าของถั่วชนิดอื่น ๆ (*Cumming และ Englyst, 1995*) จากการศึกษาลักษณะปรากฏของเม็ดสตาร์ชถั่วหรั่งที่ถูกย่อยด้วยกรดแสดงดังภาพที่ 4.16 พบว่าหลังจากการถูกย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 วัน เม็ดสตาร์ชถั่วหรั่งมีลักษณะขรุขระเกิดรอยแตกร้าวและเกิดการสึกกร่อนที่บริเวณผิวหน้า

4.4.9 ความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอ็นไซม์ของสตาร์ชถั่วหรั่ง

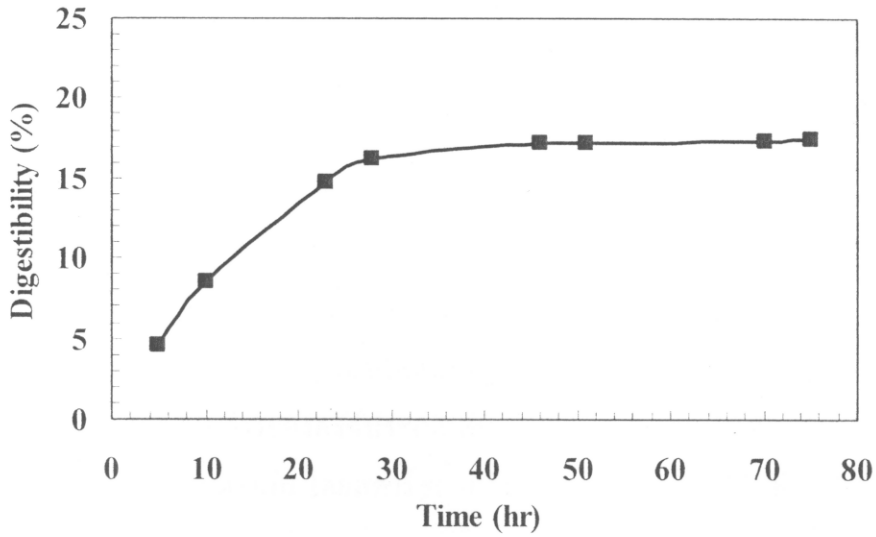
ความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอ็นไซม์อะมิเลส (porcine pancreatic α-amylase) ของสตาร์ชถั่วหรั่งแสดงดังภาพที่ 4.17 ซึ่งพบว่ารูปแบบการถูกย่อยด้วยเอ็นไซม์ของสตาร์ชถั่วหรั่งก็สามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน (two-stage pattern) เช่นเดียวกับความสามารถในการถูกย่อยด้วยกรด โดยช่วงแรกเม็ดสตาร์ชถั่วหรั่งถูกย่อยด้วยเอ็นไซม์อย่างรวดเร็ว (0- 28 ชั่วโมง) จากนั้นการย่อยเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สภาวะสมดุล (28 – 75 ชั่วโมง) ค่าความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอ็นไซม์หลังจากชั่วโมงที่ 28 เท่ากับร้อยละ 16.21 ซึ่งพบว่ามีค่าต่ำกว่าค่าความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอ็นไซม์ของถั่วชนิดอื่น ๆ ที่ศึกษาโดย Hoover และManuel (1998) ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชถั่วหรั่งมีความแข็งแรงกว่าของถั่วชนิดอื่น ๆ (*Cumming และ Englyst, 1995*)จึงทำให้เอ็นไซม์สามารถเข้าไปย่อยได้น้อยกว่า จากการศึกษาลักษณะปรากฏของเม็ดสตาร์ชถั่วหรั่งที่ถูกย่อยด้วยเอ็นไซม์อะมิเลส แสดงได้ดังภาพที่ 4.18 ซึ่งพบว่าหลังจากถูกย่อยด้วยเอ็นไซม์ 28 ชั่วโมง ผิวหน้าของเม็ดสตาร์ชเกิดเป็นรูพรุน มีลักษณะขรุขระ เกิดรอยแตกร้าว และสึกกร่อนที่บริเวณผิวหน้า



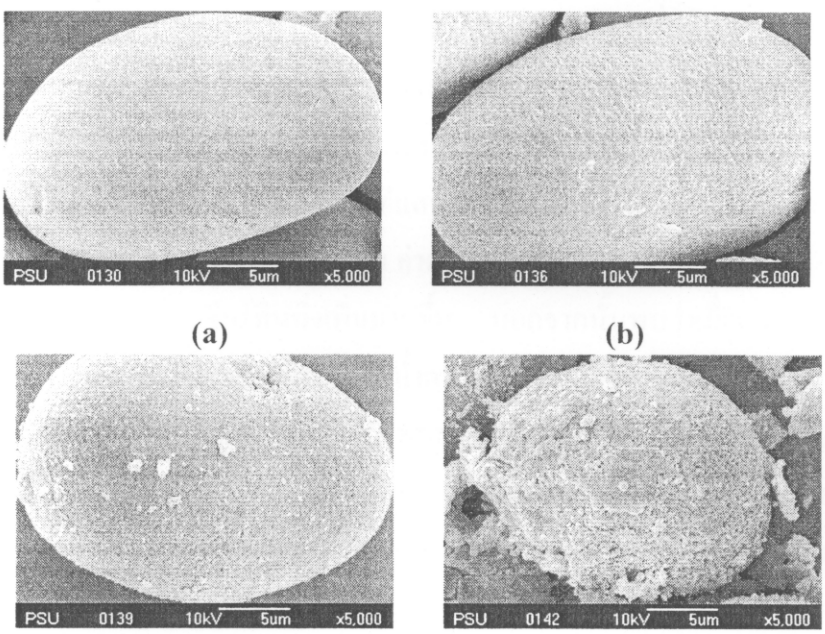
ภาพที่ 4.15 ความสามารถในการถูกย่อยด้วยกรด (ไฮโดรคลอลิก 2.2 โมล) ของสตาร์ชถั่วหรั่ง



ภาพที่ 4.16 ลักษณะปรากฏของเม็ดสตาร์ชถั่วหรั่งก่อนถูกย่อย (a) และหลังจากถูกย่อยด้วยกรด (ไฮโดรคลอลิก 2.2 โมล) เป็นเวลา 2 วัน (b) 4 วัน (c) และ 6 วัน (d) โดยทำการตรวจวัดด้วยเครื่อง Scanning electron micrographs (SEM)



ภาพที่ 4.17 ความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอ็นไซม์อะมิเลส (porcine pancreatic α-amylase) ของสตาร์ชถั่วหรั่ง



ภาพที่ 4.18 ลักษณะปรากฏของเม็ดสตาร์ชถั่วหรั่งหลังจากถูกย่อยด้วยเอ็นไซม์อะมิเลส (porcine pancreatic α-amylase) เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (a) 23 ชั่วโมง (b) 28 ชั่วโมง (c) และ 51 ชั่วโมง (d) โดยทำการตรวจวัดด้วยเครื่อง Scanning electron micrographs (SEM)

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

1. แป้งถั่วหรั่งประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต (58.38%) และโปรตีน (15.48%) เป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณสูง และมีปริมาณไขมันในระดับปานกลาง (7.90%) จึงเป็นแหล่งของสารอาหารที่มีความสมดุลดีมาก สำหรับสตาร์ชถั่วหรั่งที่ได้จากการสกัดด้วยสารละลายด่างนั้น พบว่าองค์ประกอบหลักมีเพียงคาร์โบไฮเดรตซึ่งมีค่าสูงถึงร้อยละ 88.98 โดยมีปริมาณโปรตีนและไขมันน้อยมาก จากความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมี ส่งผลให้สมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งและสตาร์ชจากถั่วหรั่ง มีความแตกต่างกัน โดยสตาร์ชถั่วหรั่งมีค่ากำลังการพองตัว ค่า breakdown และ setback ที่สูงกว่า แต่มีค่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน อุณหภูมิเริ่มต้นเกิดความหนืด และค่าความสามารถในการดูดซับน้ำและน้ำมันที่ต่ำกว่า

2. สตาร์ชถั่วหรั่งมีปริมาณอะมิโลสร้อยละ 21.67 รูปร่างเม็ดสตาร์ชเป็นทั้งแบบวงรีและแบบทรงกลม โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 31.11 ไมโครเมตร และมีโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชเป็นแบบเอ (A-type) โดยมีปริมาณผลึกร้อยละ 43.69 อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลาทิไนเซชัน(T_o) และอุณหภูมิในการเกิดความหนืด (T_p) ของสตาร์ชถั่วหรั่งเท่ากับ 71.69 และ 77.7 องศาเซลเซียส ตามลำดับ นอกจากนั้นพบว่าสตาร์ชเพสท์สามารถคงทนต่อสภาวะที่เป็นกรดในช่วง pH 4.6 ถึง 7.0 และที่ทุกระดับความเข้มข้น สตาร์ชเพสท์แสดงพฤติกรรมการไหลแบบเชียร์ทินนิ่ง (shear thinning) โดยเมื่อความเข้มข้นของสตาร์ชเพิ่มสูงขึ้น ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล (n) มีแนวโน้มลดลง ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการไหลแบบเชียร์ทินนิ่งเพิ่มมากขึ้น นอกจากนั้นพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสตาร์ชเพิ่มขึ้น และพบว่าค่าG' ของเจลสตาร์ชที่เติมน้ำตาลมอลโทส มีค่าสูงกว่า

3. การเติมน้ำตาลมอลโทสส่งผลให้ค่า G' ของเจลสตาร์ชถั่วหรั่งมีค่าเพิ่มขึ้น และพบว่าน้ำตาลมอลโทสสามารถช่วยลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชถั่วหรั่ง ซึ่งพบว่าร้อยละการสูญเสียน้ำจากการแช่เยือกแข็งและการละลาย (จำนวน 5 รอบ) และปริมาณโมเลกุลที่จัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ (short-range molecular order) มีค่าลดลง

4. รูปแบบของการถูกย่อยด้วยกรดและเอ็นไซม์ของสตาร์ชถั่วหรั่งเป็นแบบ 2 ขั้นตอน (biphasic) โดยสตาร์ชถั่วหรั่งสามารถถูกย่อยอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาเริ่มต้น จากนั้นอัตราการย่อยดำเนินไปอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่ภาวะสมดุลที่ระดับการถูกย่อยด้วยกรดและเอ็นไซม์ร้อยละ 24.11 และ 16.21 ตามลำดับ

5. สตาร์ชและแป้งจากถั่วหรั่งเหมาะที่จะนำไปใช้ทดแทนสตาร์ชและแป้งจากธัญพืช และเหมาะที่จะประยุกต์ในผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพ ได้แก่ผลิตภัณฑ์ขนมอบ และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่มีสตาร์ชและแป้งเป็นองค์ประกอบ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรง มีปริมาณอะมิโลสสูง และทนต่อการถูกย่อยด้วยเอ็นไซม์อะมิเลส และองค์ประกอบของแป้งถั่วหรั่งมีปริมาณโปรตีนสูง นอกจากนั้นพบว่าสตาร์ชถั่วหรั่งสามารถทนต่อการถูกย่อยด้วยกรดจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารที่มีความเป็นกรดได้อีกด้วย

บทที่ 6

เอกสารอ้างอิง

กิตติ เจิดรังษี. 2530. รายชื่อถั่วชนิดต่างๆที่ใช้เป็นอาหาร: สำนักงานคณะกรรมการแห่งชาติว่าด้วยมาตรฐานอาหารระหว่างประเทศ กระทรวงอุตสาหกรรม.

กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2546. เทคโนโลยีแป้ง. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตร, กรุงเทพฯ, 292 หน้า.

ชุติมัน พานิชศักดิ์พัฒนา, เพลินพิศ สงสังข์, นัลนี ศิวากรณ์, จิระ สุวรรณประเสริฐ และปรีชา สุรินทร์. 2537. โรคของถั่วหรั่ง (*Vigna subterranea*). ว.วิทย. กษ. 27: 189-201.

ภูมิสันต์ จีวิพันธ์พงค์ และ ธนาพร วีระประดิษฐ์ศิลป์. 2536. การศึกษาคุณสมบัติของถั่วหรั่งและการนำไปใช้. ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นิธิยา รัตนาปนนท์. 2545. เคมีอาหาร. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

Ahmad, F. B. and Williams, P. A. 1999. Effect of sugars on the thermal and rheological properties of sago starch. Biopolymers, 50: 401-412.

Adebowale, K.O, Afolabi, T. A. and Lawal, O. S. 2002. Isolation, chemical modification and physicochemical characterisation of Bambarra groundnut (*Voandzeia subterranean*) starch and flour. Food Chem. 78: 305-311.

Adebowal, K. O. and Lawal, O. S. 2002. Effect of annealing and heat moisture conditioningon the physicochemical characteristics of bambara groundnut *(Voandzeia subterranean)* starch. Nahrung/Food. 46: 311-316.

Adebowal, K. O. and Lawal, O. S. 2004. Comparative study of the functional properties of bambara groundnut *(Voandzeia subterranean)*, jack bean (*Cana valiaensiformis*) and mucuna bean (*Mucuna pruriens*) flour. Food Res. Int.. 37: 355-365.

Amarteifio, J. O. and Moholo, D. 1998. The chemical composition of four legumes consumed in Botswana. J. Food Com. and anal. 11: 329-332.

Association of Official Analytical Chemists (AOAC). 1999. Official methods of analysis: 15th Ed. Arlington, VA.: Association of Official Analytical Chemists.

Available online: http://members.thai.net/oard8/pea/index-pea.htm

Billiaderis, C. G. and Juliano, B. O. 1993. Thermal and mechanical-properties of concentrated rice starch gels of varying composition. Food Chem. 48(3): 243-250.

Cairns, P., Leloup, V. M., Miles, M. J., Ring, S. G. and Morris, V. J. 1990. Resistant starch: An X-ray diffraction study into the effect of enzymatic hydrolysis on amylose gels in vitro. J. Cereal Sci. 12: 203-206.

Clark, A. H. and Ross-Murphy, S. B. 1987. Structural and mechanical properties of biopolymer gels. Adv. polym. Sci., 85: 57-192.

Chen, Z., Schols, H. A. And Voragen, A. G. J. 2003. Physicochemical properties of starches obtained from three different varieties of chinese sweet potatoes. J. Food Sci. 68 : 431-437.

Chung, K. M., Moon, T. W. and Chun, J. K. 2000. Influense of annealing on gel properties of mung bean starch. Cereal Chem. 77: 567-571.

Cummings, J. H. and Englyst, H. N. 1991. Measurement of starch fermentation in the human large intestine. Canadian J. Physio. Pharmaco. 69:121-129.

Czuchajowska, Z., Klamczynski, A., Paszezynska, B. and Bail, B., K. 1998. Structure and functionality of barley starches. Cereal Chem. 75: 747-754.

Duke, J. A., Okigbo, B. N., Reed, C. F., and Weder, J. K. P. 1986. *Voandzeia subterranea* (L). Thouars, Handbook of Legume of world Economics Importance. pp. 307-310.

Goodfellow, B. and Wilson, R. H. 1990. A Fourier transform IR study of the gelation of amylose and amylopectin. Biopolym. 30: 1183-1189.

Gujska, E., Reinhard, W. D. and Khan, H. 1994. Physicochemical properties of field pea, pinto and navy bean starches. J. Food Sci. 59 : 634-636.

Hoover, R. and Manuel, H. 1996. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of legume starches. Food Res. Inter. 29(8): 731-750.

Hoover, R. and Ratnayake, W. S. 2002. Starch characteristics of black bean, chick pea, Lemtil, navy bean and pinto bean cultivars grown in Canada. J. Food Chem. 78: 489-498.

Hoover, P. 2001. Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: a review. Carbohydr. Polym. 45: 253-267.

Katsuta, K., Nishimura, A. and Miura, M. 1992. Effect of saccharides on stabilities of rice starch gels. 1. Mono- and disaccharides. Food hydrocolloids. 6(4): 387-398.

I' Anson, K. J., Milles, M. J., Morris, V. J., Besford, L. S., Jarvis, D. A. and Marsh, R. A. 1990. The effects of added sugars on the retrogradation of wheat starch gels. J. Cereal Sci. 11: 243-248.

Leach, H. W. 1965. Gelatinization of starch. Page 289-307 in R. L. Whistler, J. N. Bermiller and E. F. Paschall, eds., Starch, Chemistry and Technology, Academic Press, New York.

Lii, C. Y., Shao, Y. Y. and Tseng, K. H. 1995. Gelation Mechanism and rheological properties of rice starch. Cereal Chem. 72(4): 393-400.

Mudhusudhan, B. and Tharanathan, R. N. 1995a. Legume and cereal starch-why differences in digestibility Part I. Isolation and composition of legume (green gram and Bengal gram) starches. Starch. 47: 165-171.

Mudhusudhan, B. and Tharanathan, R. N. 1995b. Legume and cereal starch-why differences in digestibility Part II. Isolation and characterization of starches from rice. (*O. sativa*) and ragi (finger millet, E. coracana). Carbohydr. Polym. 28: 153-158.

Mudhusudhan, B. and Tharanathan, R. N. 1996. Enzyme debranching studies on green gram (P. aureus) starch fractions. Carbohydr. Polym. 29: 41-44.

NAS. 1979. Tropical Legume: Resources for the future, II. 47-53. Washington, D. C, National Academe of Sciences.

Noel, T. R., Ring, S. G. And Whittam, M. A. 1993. Physical properties of starch products. Structure and functional. In E. Dickinson, and P. Walstra (ed.), Food colloids and polymers: stability and mechanical properties, 126-135. Cambridge, Royal Society of Chemistry.

Padilla F.C., Alvarez M.T. and Alfaro M. J. 1996. Functional properties of barinas nut flour (*Caryodendron orinocense* Karst., Euphorbiaceae) compared to those of soybean. Food Chem. 57: 191-196.

Prokopowich, D. J. and Billiaderis, C. G. A. 1995. Comparative study of the effect of sugars on the thermal and mechanical properties of concentrated waxy maize, wheat, potato and pea starch gels. Food Chem. 52: 255-262.

Purseglove, J. W. 1977. Tropical Crops: Dicotyledons. London, Longman Group Ltd.

Simpson, H. C., Lousley, R. S., Greekie, M., Hockaday, T. D. R., Carter, R. D., and Mann, J. I. 1981. A high carbohydrate leguminous fiber diet improves all aspects of diabetes control. Lancet. 1: 1-4.

Schoch, T. J. 1964. Swelling power and solubility of granular starch. In R. L. Whistler (ed.), Methods in Carbohydrate Chemistry, pp. 106-108. New York: Academic Press.

Shanthy, A. P., Sowbhagya, C. M. and Bhattacharya, K. R. 1980. Simplified determination of water-insoluble amylose content of rice. Starch. 12: 409-411.

Soni, G. L., George, M., and Singh, R. 1982. Role of common Indian pulses as hypocholesterolemic agents. Ind. J. Nutr. Diet. 19: 184-190.

Stick, R. V. 2000. Carbohydrates: The Sweet molecules of life. New York : Academic Press.

Tsai, M., Li, C. and Lii, C. 1997. Effect of granular structures on the pasting behaviors of starches. Cereal Chem. 74(6): 750-757.

van Soet, J. J. G., Tournois, H., de Wit, D. J. F. and Vliegenthart, J. F. G. 1994. Retrogradation of potato starch as studied by Fourier-Transform Infared Spectroscopy. Starch/Starke. 46(12): 453-457.

Wang, W. J., Powell, A. D., and Oats, C. G. 1995. Pattern of enzyme hydrolysis in raw sago starch: effects of processing history. Carbohydr. Polym. 26 : 91-97.

Whistler, R. L. and BeMiller J. N. 1997. Carbohydrate Chemistry for Food Scientists. Minnesota : Eagan Press.