



รายงานการวิจัย

การพัฒนากระบวนการแปรรูปใยอาหารละลายน้ำได้แบบไพโรเดกซ์-
ตรินจากแป้งมันสำปะหลัง
(Process Development of Soluble Fiber as Pyrodextrin from
Cassava Starch)



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การพัฒนากระบวนการแปรรูปใยอาหารละลายน้ำได้แบบไพโรเดกซ์-

ตรินจากแป้งมันสำปะหลัง

(Process Development of Soluble Fiber as Pyrodextrin from
Cassava Starch)

ผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุนันทา ทองทา

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2559-2560

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ตุลาคม 2563

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้งบประมาณทุนอุดหนุนวิจัยประจำปีงบประมาณ 2559-2560 ทำให้ผลงานวิจัยนี้เกิดขึ้นได้ ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารีและเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือ สำหรับอาคาร สถานที่ เครื่องมือ และการอำนวยความสะดวกในการวิจัย และงานวิจัยนี้คงไม่สำเร็จได้หากขาดผู้ช่วยวิจัย คือ นางสาวเกวลีพร้อมพิพัฒน์พร จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย



บทคัดย่อ

การศึกษาสภาวะการสำหรับผลิตโยอาหารละลายน้ำได้หรือไฟโรเดกซ์ตริน ได้ทำการศึกษา โดยแปรอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยา ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก และระยะเวลาในการการทำปฏิกิริยา เมื่อตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมี และกายภาพด้านต่างๆ ของไฟโรเดกซ์ตรินที่ได้ พบว่า ปริมาณ available starch และความขาวของไฟโรเดกซ์ตรินมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรด โดยไฟโรเดกซ์ตรินซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิต่ำจะมีความสามารถในการละลายน้ำและค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านสูงกว่าการเตรียมที่อุณหภูมิสูง แต่อย่างไรก็ตามที่ทุกสภาวะการผลิตจะได้ไฟโรเดกซ์ตรินที่มีความหนืดค่อนข้างต่ำ

ผลของการดัดแปรพื้นผิวเม็ดสตาร์ช ด้วยวิธีการย่อยด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยว และแบบผสม, ย่อยด้วยกรด และย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วยบอลมิลล์ ได้ศึกษาก่อนการนำไปเตรียมเดกซ์ตริน ด้านทานการย่อย (Resistant Dextrin) เมื่อย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเพียงอย่างเดียว หรือ ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียงอย่างเดียว, ย่อยด้วยเอนไซม์ผสมระหว่างเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส และย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าระดับการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์มีค่าต่ำกว่าการย่อยด้วยกรด

ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวิธีการดัดแปร โดยพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์จะมีรูพรุน และช่องเปิดเกิดขึ้นบนพื้นผิว แต่รูปร่างและขนาดของเม็ดสตาร์ชไม่แตกต่างจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ ส่วนพื้นผิวของสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด มีความขรุขระตลอดทั้งพื้นผิว เม็ดสตาร์ชบางส่วนมีขนาดเล็กกลาง บางส่วนถูกหลอมเข้ามาติดกันทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น และยังพบว่ามีปริมาณผลึกมีค่าสูงที่สุด (34.88%) สำหรับสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย บอลมิลล์ พื้นผิวที่เกิดขึ้นมีความขรุขระและสูญเสียความเป็นแกรนูลไป กลายเป็นเศษชิ้นส่วนเล็กๆ และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยลดลงเหลือเพียง 9.96 ไมครอน เมื่อตรวจสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน ด้วยวิธีการดูดซับแก๊สไนโตรเจน พบว่า สตาร์ชหลังดัดแปรมีพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนเพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วยบอลมิลล์มีการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรและเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนมากที่สุด คือ $3.58 \text{ m}^2/\text{g}$, $0.82 \text{ cm}^3/\text{g}$ และ 47.11 nm ตามลำดับ

การศึกษาผลของการเตรียมเดกซ์ตรินด้านทานการย่อยจากสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิว ด้วยวิธีการต่างๆ พบว่า ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชของเดกซ์ตรินด้านทานไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ปริมาณผลึกมีค่าลดลง ค่าความขาวและความสามารถในการละลายน้ำของเดกซ์ตริน ด้านทานการย่อยที่เตรียมจากสตาร์ชที่ดัดแปรพื้นผิวโดยใช้เอนไซม์และกรด มีค่าต่ำกว่าเดกซ์ตริน ด้านทานการย่อยที่เตรียมจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ แต่ปริมาณโยอาหารมีค่าสูงกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เดกซ์ตรินด้านทานที่เตรียมจากสตาร์ชที่ถูกดัดแปรพื้นผิวด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสมีปริมาณโยอาหารสูงที่สุด (64.68%) ซึ่งเดกซ์ตรินด้านทานการย่อยที่เตรียมจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบซึ่งมีค่าเพียง 45.10% ส่วนเดกซ์ตรินที่เตรียมจากสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball mill สามารถละลายน้ำได้น้อย (23.40%) และมีปริมาณโยอาหารต่ำที่สุด (12.30%)

Abstract

Soluble dietary fiber production or pyrodextrin was studied by varying the reaction temperature, HCl acid concentration, and the reaction time. The chemical and physical properties analysis showed that the available starch and the whiteness of pyrodextrin decreased with increasing the temperature and HCl acid concentration. At low temperature preparation, the water solubility and the percentage of transmittance of pyrodextrin were higher than those prepared at higher temperatures. However, all pyrodextrins showed a relatively low viscosity.

The effects of starch granule surface modification by enzymatic treatment, single or mixed enzymes, acid hydrolysis and acid hydrolysis followed by ball-mill prior to prepare resistant dextrin were studied. When starch was hydrolyzed with a single enzyme, α -amylase or amyloglucosidase, mixed enzymes of α -amylase and amyloglucosidase and hydrochloric acid at 55°C for 6 h, the degree of enzyme hydrolysis was lower than that of acid hydrolysis.

Morphology and surface of the starch granule were different, depending on the modification methods. The surface of starch granules after enzymatic hydrolysis, showed voids and cavities. However, the shape and size of starch granules were not different from those of raw cassava starch granules. Acid hydrolysis induced surface roughness throughout the granules. Some granules were small or fused together into larger ones. The relative crystallinity of acid hydrolyzed starch granules was highest at 34.88%. For the acid treatment followed by ball-milling, surface of starch granules clearly showed roughness. The granular structure disappeared and became smaller with an average diameter of 9.96 micron. The specific surface area, volume of pore and the average diameter of their pores were determined with nitrogen gas adsorption. The surface of modified starch granules exhibited an increase in their specific surface area, volume and average diameter. The acid hydrolysis followed by ball-milled sample showed the highest specific surface area, pore volume and average diameter at 3.58 m²/g, 0.82 cm³/g and 47.11 nm, respectively.

The effect of resistant dextrin prepared from starches modified with different methods was studied. The starch morphology and surface of resistant dextrin were altered but the relative crystallinity was decreased. The whiteness and water solubility of resistant dextrin prepared from starch modified surface using enzymes and acid hydrolyzed starch are lower but the total dietary fiber content is higher than resistant dextrin prepared from native cassava starch. Especially, resistant dextrin from modified starch granule surface with amyloglucosidase has the highest total dietary fiber (64.68%), compared to that of resistant dextrin prepared from

native cassava starch, which was a 45.10%. The resistant dextrin prepared from acid hydrolyzed starch followed by ball-milling was less soluble water (23.40%) and the lowest content of total dietary fiber (12.30%).



สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม (reviewed literature)/ สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง ...	4
บทที่ 3 วัสดุและวิธีการวิจัย.....	11
3.1 วัสดุทดลอง.....	11
3.2 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโยอาหารละลายน้ำ	11
3.3 การตรวจสอบสมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์โยอาหารละลายน้ำ.....	11
3.4 การลดขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังด้วย กรด เอนไซม์ และเครื่องบดลิมิลล์.....	12
3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเม็ดแป้งหลังถูกดัดแปรด้วยวิธีต่าง ๆ.....	13
3.6 การเตรียมไพโรเดกซ์ตริน (เดกซ์ตรินต้านทานการย่อย) จากแป้งมันสำปะหลังอนุภาค ขนาดเล็ก	15
3.7 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของไพโรเดกซ์ตริน(เดกซ์ตรินต้านทานการ ย่อย) จากแป้งมันสำปะหลังอนุภาคขนาดเล็ก	15
3.8 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ผลทางสถิติ	19
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	20
4.1 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโยอาหารละลายน้ำ (ไพโรเดกซ์ตริน) และ สมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์โยอาหารละลายน้ำ	20
4.2 การลดขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังโดยการใช้กรดหรือเอนไซม์.....	27
4.3 ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังดัดแปรด้วยวิธีการ ต่าง ๆ.....	30
4.4 ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการดัดแปร ..	37
4.5 ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการดัดแปร ..	40
4.6 ผลของขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนของสตาร์ชดัดแปร ..	41
4.7 สีของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชดัดแปร	45
4.8 ผลของการเตรียมไพโรเดกซ์ตริน (เดกซ์ตรินต้านทานการย่อย) จากสตาร์ชดัดแปรต่อ คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ	45
บทที่ 5 ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ	56
บรรณานุกรม.....	57

สารบัญ

	หน้า
ภาคผนวก.....	64
ประวัติผู้วิจัย.....	70



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ค่าความหนืดของแต่ละสภาวะในการทำปฏิกิริยา Pyrodextrinization.....	21
ตารางที่ 4.2 ค่าความขาวของใยอาหารละลายน้ำ (ไฟโรเดกซ์ตริน) ที่เตรียมได้จากสภาวะต่างๆ ของการทำปฏิกิริยา Pyrodextrinization.....	22
ตารางที่ 4.3 ปริมาณ Available starch (AS, %).....	27
ตารางที่ 4.4 ปริมาณผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา- อะมิเลส (AA), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วย เอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส AA+AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วย กรด (AS), (และ สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดและบดด้วย ball mill (ASBM)	40
ตารางที่ 4.5 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native), สตาร์ชที่ย่อยด้วย เอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA+AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS), และ สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบด ด้วย ball mill (ASBM)	40
ตารางที่ 4.6 ปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ, ปริมาตรของรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของ รูพรุน ของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์ อะมิโลกลูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส AA+AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS), และ สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball mill (ASBM).....	42
ตารางที่ 4.7 สีของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์ อะมิโลกลูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส AA+AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS), และ สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบด ด้วย ball mill (ASBM).....	45
ตารางที่ 4.8 ปริมาณผลึกของเดกซ์ตรินต้านทานการย่อย หลังกระบวนการเดกซ์ตรินไนเซชันของ สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโล- กลูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA+AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS), และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดและบดด้วย ball mill (ASBM)	48
ตารางที่ 4.9 ค่าความขาวของเดกซ์ตรินต้านทานการย่อยที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Dextri- nized Native), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA), สตาร์ชที่ย่อยด้วย เอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับ เอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA+AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS), และสตาร์ชที่ย่อย ด้วยกรด แล้วบดด้วย ball mill (ASBM).....	51

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.10 ความสามารถในการละลายน้ำของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยที่ผลิตจากสตาร์ช มันสำปะหลังดิบ (Dextrinized Native), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA), สตาร์ชที่ย่อย ด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์ แอลฟาอะ มิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA+AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS), และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball mill (ASBM)	52
ตารางที่ 4.11 ปริมาณใยอาหารที่ละลายน้ำได้มวล์โมเลกุลสูง (HMWDF), มวล์โมเลกุลต่ำ (LMWDF) และปริมาณใยอาหารทั้งหมด (TDF) ของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยผลิตจาก สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Dextrinized Native), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา- อะมิเลส (AA), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วย เอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA+AMG), สตาร์ชที่ย่อย ด้วยกรด (AS), และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball mill (ASBM).....	54

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 3.1	แผนภาพหลักการการวิเคราะห์ปริมาณใยอาหารตามวิธีของ AOAC 2011.25.....	18
ภาพที่ 4.1	ความสามารถในการละลายของไฟโรเดกซ์ตรินที่ผลิตในสภาวะต่างๆ โดยไม่ใช้กรดในการ ทำปฏิกิริยา (control) เมื่อ <input checked="" type="checkbox"/> คือ ไฟโรเดกซ์ตรินที่ละลายอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และ <input type="checkbox"/> คือ ไฟโรเดกซ์ตรินที่ละลายที่อุณหภูมิห้อง.....	23
ภาพที่ 4.2	ความสามารถในการละลายของไฟโรเดกซ์ตรินที่ผลิตในสภาวะต่างๆ โดยใช้กรด HCl 2.2 M ร่วมในการทำปฏิกิริยา เมื่อ <input checked="" type="checkbox"/> คือ ไฟโรเดกซ์ตรินที่ละลายที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และ <input type="checkbox"/> คือ ไฟโรเดกซ์ตรินที่ละลายที่อุณหภูมิห้อง.....	24
ภาพที่ 4.3	ความสามารถในการละลายของไฟโรเดกซ์ตรินที่ผลิตในสภาวะต่างๆ โดยใช้กรด HCl 3.2 M ร่วมในการทำปฏิกิริยา เมื่อ <input checked="" type="checkbox"/> คือ ไฟโรเดกซ์ตรินที่ละลายที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และ <input type="checkbox"/> คือ ไฟโรเดกซ์ตรินที่ละลายที่อุณหภูมิห้อง.....	24
ภาพที่ 4.4	ค่าความขุ่นของไฟโรเดกซ์ตรินที่เตรียมโดยให้ความร้อนเป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง เมื่อละลาย ที่อุณหภูมิห้อง.....	25
ภาพที่ 4.5	ค่าความขุ่นของไฟโรเดกซ์ตรินที่เตรียมโดยให้ความร้อนเป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง เมื่อละลาย ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส.....	26
ภาพที่ 4.6	ปริมาณการย่อยของสตาร์ชด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยว คือ ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส เพียงอย่างเดียว (AA) และ ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส เพียงอย่างเดียว (AMG), แบบผสม คือ ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA+AMG) และย่อยด้วยกรด (AS)	29
ภาพที่ 4.7	ลักษณะเม็ดสตาร์ชของตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการตัดแปรด้วยวิธีการ ต่างๆ ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 1,000 (1) และ 6,000 (2) เท่า: A) สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ, B) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง, C) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง, D) สตาร์ชที่ย่อย ด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง, E) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลู- โคซิเดสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง, F) ที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิ- โลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง, G) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับ เอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง, H) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง, I) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และ J) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมงแล้วบดด้วย ball mill.....	33

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.8 ลักษณะเม็ดสตาร์ชของตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการตัดแปรด้วยวิธีการต่าง ๆ ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 30,000 เท่า:
 A) สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ, B) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง, C) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง, D) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง, E) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง, F) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง, G) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง, H) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง, I) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และ J) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมงแล้วบดด้วย ball mill.....34

ภาพที่ 4.9 ลักษณะโครงสร้างผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA+AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS), และ สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball mill (ASBM)39

ภาพที่ 4.10 ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption) และการคายซับ (Desorption) แก๊สไนโตรเจนของตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลัง และ A แสดงจุดเปลี่ยนของกราฟ เมื่อการดูดซับแบบขั้นเดียวเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์.....42

ภาพที่ 4.11 การกระจายตัวตามขนาดของรูพรุนของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA+AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS), และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball mill (ASBM)44

ภาพที่ 4.12 ลักษณะรูปร่างของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 1,000 (1) และ 6,000 (2) เท่า: A) สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ, B) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส, C) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส, D) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส, E) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด และ F) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดและบดด้วย ball mill.....47

ภาพที่ 4.13 ลักษณะโครงสร้างผลึกของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย ที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA+AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS), และ สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball mill (ASBM)49

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

มันสำปะหลังเป็นพืชสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย เป็นพืชที่ปลูกง่าย ทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศที่แปรปรวน สามารถเจริญเติบโตได้ในพื้นที่ๆ ดินมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ผลตอบแทนต่อไร่สูง และมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าพืชอื่น ๆ หลายๆ ชนิด สำหรับประเทศไทยมีการนำมันสำปะหลังเข้ามาปลูก ที่ภาคใต้เป็นครั้งแรก เพื่อใช้ทำแป้งและสาคุ ต่อมาได้ขยายพื้นที่ปลูกมายังภาคตะวันออกเฉียงใต้แก่ จังหวัดชลบุรี ระยอง และจังหวัดใกล้เคียง เนื่องจากมีสภาพดิน ฟ้า อากาศ และสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการปลูก การแปรรูปมันสำปะหลัง ดังนั้น จึงมีการขยายพื้นที่ปลูกอย่างรวดเร็วไปสู่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งในปัจจุบันนี้ได้กลายเป็นแหล่งปลูกที่ใหญ่ที่สุดของประเทศไทย (Agricultural Futures Trading Commission, 2007) แป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่มีความบริสุทธิ์สูง สามารถนำไปใช้ได้ ในอุตสาหกรรมหลากหลาย เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมไม้อัด อุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์ และอุตสาหกรรมผลิตพลาสติกที่ย่อยสลายได้ เป็นต้น การใช้ประโยชน์จากแป้งมันสำปะหลังมีทั้งในรูปของแป้งดิบ (native starch) และแป้งดัดแปร (modified starch) โดยการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังสามารถทำได้ทั้งวิธีทางเคมีทางกายภาพ และทางชีวภาพ เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะการผลิตและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2543) ปัจจุบัน มีการดัดแปรแป้งให้เป็นแป้งเพื่อสุขภาพที่มีคุณสมบัติที่เป็นประโยชน์ต่อสุขภาพ ได้แก่ แป้งต้านทานการย่อย (resistant starch, RS) และเดกซ์ทริน ต้านทานการย่อย (resistant dextrin or indigestible dextrin) ซึ่งสองอย่างนี้แสดงคุณสมบัติเหมือนกับใยอาหารที่ได้จากธรรมชาติ

ใยอาหาร (Dietary fiber) คือ ส่วนของพืชผัก ผลไม้ หรือเมล็ดธัญพืชที่มนุษย์ได้รับประทานเข้าไป แต่จะไม่ถูกย่อยโดยน้ำย่อยของคนจึงไม่ให้อพลังงาน แต่สามารถถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ในลำไส้ของมนุษย์ ใยอาหารประกอบด้วยส่วนที่ไม่ละลายน้ำและส่วนที่ละลายน้ำ ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะทนต่อการถูกย่อยจากเอนไซม์บริเวณลำไส้เล็กในร่างกายมนุษย์ จากการที่ใยอาหารไม่ถูกย่อยเมื่อผ่านเข้าไปถึงส่วนของลำไส้ใหญ่จะถูกหมักโดยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นกรดไขมันสายสั้น (short-chain fatty acid) ที่ประกอบด้วยกรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทริกและเกิดก๊าซรวมออกมาด้วย ซึ่งกรดไขมันทั้งสามชนิดนี้สามารถถูกดูดซึมได้ภายในลำไส้ใหญ่ และขนส่งไปถึงตับได้ โดยกรดไขมันที่เกิดขึ้นจะไปยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ก่อโรค เพิ่มปริมาณของเหลวและปรับสภาวะการเป็นกรด-ด่างภายในลำไส้ใหญ่ให้ต่ำลง อีกทั้งกรดไขมันที่สร้างขึ้นจะมีผลในทางสรีรวิทยาโดยกรดบิวทริกจะช่วยปรับสภาวะตอนปลายของลำไส้ใหญ่ให้สมบูรณ์ ยับยั้งการเจริญของ transformed cell ในสิ่งมีชีวิต สามารถยับยั้งการเจริญของเนื้องอกและลดเซลล์มะเร็งในลำไส้ใหญ่ได้ นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มการดูดซึมของแร่ธาตุ (Ca^{++} และ Mg^{++}) เพิ่มการใช้พลังงาน มีผลในเชิงบวกต่อการเผาผลาญน้ำตาลและไขมัน เมื่อบริโภคพร้อมกับอาหารจะทำให้เกิดความรู้สึกอิ่ม

อย่างไรก็ตาม โยอาหารส่วนใหญ่และ RS มีความสามารถในการอุ้มน้ำต่ำ ไม่สามารถละลายน้ำได้ และจัดเป็นโยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (non-soluble fiber) ทำการใช้ประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรมอาหารบางชนิดยังไม่กว้างขวาง ดังนั้นการพัฒนาโยอาหารละลายน้ำจึงเป็นทางเลือกใหม่ที่น่าสนใจในการพัฒนาต่อยอดจากการผลิตโยอาหารเพื่อสุขภาพ ทั้งนี้จากคุณสมบัติการละลายน้ำสามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้หลายประเภท โดยเฉพาะอาหารที่เป็นของเหลว อาหารที่เป็นของแข็งและอาหารกึ่งเหลวกึ่งแข็ง ซึ่งปัจจุบันเป็นที่ต้องการของท้องตลาด และเป็นตลาดที่มีขนาดใหญ่โดยเฉพาะเครื่องดื่ม และลูกกวาด รวมทั้งสามารถนำไปเป็นองค์ประกอบในอาหารสำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวานได้อีกด้วย ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับแป้งมันสำปะหลังที่ผลิตกันมากในประเทศไทย อีกทั้งการบริโภคโยอาหารละลายน้ำยังให้คุณประโยชน์ต่อสุขภาพเทียบเท่ากับการบริโภค RS ที่จัดเป็น prebiotic ในด้านของระบบขับถ่ายอีกด้วย

โยอาหารละลายน้ำสามารถผลิตจากเดกซ์ตริน ซึ่งตัดแปรโครงสร้างแป้งดิบด้วยการย่อย (hydrolysis) โดยใช้เอนไซม์ หรือ กรด เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการย่อย ซึ่งจะใช้น้ำเป็นตัวกลาง ทำให้สารละลายอยู่ในรูปคอลลอยด์ หรือการให้ความร้อนสูงร่วมกับกรดทำปฏิกิริยากับแป้งความชื้นต่ำ (dry starch) เพื่อลดขนาดและเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลแป้ง ซึ่งกระบวนการนี้จะเรียกว่า “pyrolysis” (Wurzburg, 1995) ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ได้มีการศึกษากระบวนการนำแป้งชนิดต่างๆ มาเตรียมเดกซ์ตรินด้านทานการย่อยต่อเอนไซม์ (non-digestible dextrin or indigestible dextrin) ด้วยกระบวนการ pyroconversion โดย Wang และคณะ (2001) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมและคุณสมบัติของ indigestible dextrin จากแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสสูง Kwon และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษากระบวนการเตรียมและคุณสมบัติของไฟโรเดกซ์ตรินจากแป้ง waxy sorghum นอกจากนี้ยังมีศึกษากระบวนการเตรียมไฟโรเดกซ์ตรินในแป้งอื่นๆ เช่น lima bean starch, lentil, dark sorghum, cocoyam, sagu (Laurentin et al., 2003) และ cowpea (Campechano et al., 2007) เป็นต้น โดยไฟโรเดกซ์ตรินนี้จะมีคุณสมบัติเป็นพรีไบโอติกเหมือนกับโยอาหารที่ได้จากธรรมชาติและ RS (Wang et al., 2001) แต่มีคุณสมบัติเด่นในการละลายน้ำได้ดี และให้ความหนืดต่ำ (Leszczynski, 2004) อย่างไรก็ตาม มีการรายงานว่าไฟโรเดกซ์ตรินที่ผลิตได้จะมีสีเหลืองถึงสีน้ำตาลเข้มเมื่อสภาวะในการทำปฏิกิริยารุนแรงมากขึ้น

ความร้อน ความเข้มข้นของกรด และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา pyroconversion เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการผลิตไฟโรเดกซ์ตรินเป็นอย่างมาก ซึ่งขั้นตอนการผลิตจำเป็นต้องใช้ความร้อน ความเข้มข้นของกรดสูง และใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานเพื่อให้ได้ปริมาณ indigestible starch และปริมาณโยอาหารที่สูง ด้วยกระบวนการผลิตนี้ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์สีเหลืองจนถึงสีน้ำตาลที่ไม่เป็นที่ต้องการ และบางส่วนที่เกิดการไหม้จากสภาวะที่รุนแรงซึ่งทำให้ความสามารถในการละลายน้ำลดลงไม่เหมาะแก่การนำไปใช้ในอาหาร ทำให้ต้องมีกระบวนการย่อยด้วยเอนไซม์เพื่อเพิ่มปริมาณ indigestible starch และปริมาณโยอาหาร การฟอกสีเพื่อเพิ่มความขาว กระบวนการกำจัดเกลือและไอออนต่างๆ ด้วยเครื่องมือที่ซับซ้อนมีราคาแพง และใช้พลังงานสูง (Okuma & Wakabayashi, 2001) จากปัญหาดังกล่าว จึงควรมีการศึกษาหาวิธีการผลิตไฟโรเดกซ์ตรินที่เหมาะสม การเพิ่มพื้นที่

ผิวหรือการดัดแปลงรูปร่างลักษณะของเม็ดแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีการใช้เอนไซม์ กรด และวิธีทางกล อาจเป็นวิธีที่ทำให้แป้งมันสำปะหลังมีความไวต่อการทำปฏิกิริยามากขึ้น และลดความรุนแรงของสถานะที่ใช้ในการผลิตลง ทำให้ได้ไฟโรเดกซ์ตรินหรือเดกซ์ตรินต้านทานการย่อยที่มีปริมาณ indigestible starch และปริมาณใยอาหารสูง และมีความขาวโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการฟอกสี

จากศักยภาพในเชิงอุตสาหกรรมของแป้งมันสำปะหลังจะเห็นว่าประเทศไทยเป็นประเทศที่สามารถผลิตและส่งออกแป้งมันสำปะหลังได้มาก และแป้งมันสำปะหลังมีราคาถูกเมื่อเทียบกับแป้งอื่นๆ การใช้ประโยชน์จากแป้งมันสำปะหลังโดยการพัฒนาคุณภาพของแป้งมันสำปะหลังและพัฒนาผลิตภัณฑ์จึงเป็นสิ่งสำคัญ ดังนั้น การศึกษากระบวนการแปรรูปใยอาหารละลายน้ำได้แบบไฟโรเดกซ์ตรินจึงเป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์แป้งมันสำปะหลังและถือเป็นนวัตกรรมใหม่ในการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากแป้งมันสำปะหลัง ทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าและสนับสนุนการค้าให้กับอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง ใยอาหารละลายน้ำหรือไฟโรเดกซ์ตรินมีคุณสมบัติเด่นคือสามารถละลายน้ำได้ดีและให้ความหนืดต่ำ จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยาได้ โดยสามารถนำไปเป็นสารเพิ่มปริมาณหรือสารเพิ่มเนื้อ และสารทดแทนไขมันในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่ม ลูกอม ชุป แยม ขนมอบ และอื่นๆ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นสารที่ช่วยในการยึดเกาะสำหรับการทำเป็นเม็ดและมีความสามารถที่ดียเยี่ยมต่อการถูกบีบอัด ซึ่งจะช่วยให้ใช้งานในรูปแบบเม็ดได้ง่ายทั้งในอุตสาหกรรมอาหารและยา (Lefranc-Millot, 2006)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการดัดแปรพื้นผิวสตาร์ชสำมะนปะหลังด้วยการใช้เอนไซม์ กรด และวิธีทางกลและตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของสตาร์ชดัดแปรพื้นผิว
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของพื้นผิวและลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันของสตาร์ชดัดแปรพื้นผิวต่อคุณสมบัติของเดกซ์ตรินต้านทานการย่อย

บทที่ 2

วรรณกรรมและทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง (Reviewed literature)

2.1 การทบทวนวรรณกรรม (reviewed literature) / สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 แป้งมันสำปะหลัง

แป้งเป็นโพลีแซคคาไรด์ (polysaccharide) ที่สำคัญที่สุดในธรรมชาติ (สุรียั พุ ตระกูล, 2528) โครงสร้างแบ่งออกเป็น 2 ส่วนที่สำคัญ คือ อะมิโลส (amylose) และ อะมิโลเพคติน (amylopectin) (Rose, 1980) อะมิโลสประกอบด้วยหน่วยของกลูโคสหลายหน่วยต่อกันด้วยพันธะ ไกลโคไซด์ (glycosidic bond) ที่ตำแหน่งแอลฟา 1-4 (α -1,4) มีลักษณะเป็นเส้นตรง มีปริมาณ 20-30% (Whistler et al., 1984) มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 2,000-500,000 เมื่ออยู่ในน้ำจะมีลักษณะ บิดตัวเป็นเกลียวแบบฮีลิคซ์ (helix) (Whistler et al., 1984) ส่วน อะมิโลเพคติน เป็นโพลีแซคคาไรด์ที่มีสายของโมเลกุลต่อกันแบบกิ่งก้าน (branch) สายอะมิโลสสายสั้นๆ จะต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่งแอลฟา 1-6 (α -1,6 glycosidic bond) เมื่อละลายน้ำจะมีลักษณะเป็นคอลลอยด์ และมีน้ำหนักโมเลกุลไม่แน่นอนอยู่ในช่วง 50,000-1,000,000

แป้งมันสำปะหลังที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในอาหารสำเร็จรูป เนื่องจากมีคุณสมบัติพิเศษในการช่วยการยึดเกาะ การแข็งตัว ทำให้เกิดความเข้มข้นได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้แป้งมันสำปะหลังสามารถนำมาแปรสภาพเป็นสารให้ความหวาน เช่น กลูโคสไซรัป ฟรุคโตรอสไซรัป สารให้ความหวานที่มีพลังงานต่ำเช่น น้ำตาลแอลกอฮอล์ต่างๆ และสารปรุงแต่ง เช่น ผงชูรส เป็นต้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล, 2543)

2.2.2 โยอาหาร (dietary fiber)

โยอาหาร (dietary fiber) คือ ส่วนของพืชผัก ผลไม้ หรือเมล็ดธัญพืชที่มนุษย์ได้รับ ประทานเข้าไป แต่จะไม่ถูกย่อยโดยน้ำย่อยของคนจึงไม่ให้พลังงาน แต่สามารถถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ใน ลำไส้ของมนุษย์ โยอาหารประกอบด้วยส่วนที่ไม่ละลายน้ำและส่วนที่ละลายน้ำ ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะทน ต่อการถูกย่อยจากเอนไซม์บริเวณลำไส้เล็กในร่างกายมนุษย์ (Trowell et al., 1986) โยอาหารที่ ละลายน้ำได้ส่วนใหญ่จะถูกหมักในลำไส้ใหญ่ จึงมีประโยชน์เป็นพรีไบโอติกผลจากกระบวนการหมัก จะทำให้เกิดแก๊ส (CO_2 , CH_4 และ H_2) ซึ่งจะถูกขับออกตามธรรมชาติ หนึ่งในการศึกษาระยะสั้นได้ แสดงผลลัพธ์ของความสามารถในการทนต่อการย่อย โดยทดลองในอาสาสมัครจำนวน 20 คน (Gordon & Okuma, 2002) ใช้เวลาในการศึกษา 1 สัปดาห์ โดยทดสอบการเพิ่มปริมาณของเดกซ์ ทรินที่ไม่ถูกย่อย (indigestible dextrin) หรือ placebo ที่มีปริมาณ 10, 15, 30, 45, 60 และ 80 กรัม/วัน ผลที่ได้คือ ไม่มีอาการของการท้องเสียจากการบริโภคอาหารที่มี dextrin แม้ว่าจะได้รับใน ปริมาณสูงถึง 80 กรัม/วัน มีเพียงแต่อาการของการมีแก๊สในกระเพาะมากกว่าปกติเมื่อได้รับใน ปริมาณ 60 และ 80 กรัม/วัน และในวันสุดท้ายของการทดสอบในปริมาณ 80 กรัม ผู้ทดสอบมี

อาการท้องอืด จากการศึกษาครั้งนี้ จึงได้กำหนดระดับการบริโภคที่ไม่ทำให้เกิดอาการผิดปกติเกี่ยวกับท้องสำหรับผู้ใหญ่คือ 45 กรัม/วัน

ผลการศึกษาในระยะยาวของการทนต่อการย่อยของใยอาหารที่ละลายน้ำได้ ถูกทดสอบในอาสาสมัครจำนวน 48 คน (Pasman et al., 2006) หลังจาก 1 สัปดาห์ในช่วงการทดสอบอาสาสมัครประมาณ 16 คน/กลุ่ม จะได้รับ dextrin ที่ไม่ถูกย่อย หรือ placebo คนละ 30 หรือ 45 กรัม/วัน ผลที่เกิดขึ้นคือ ไม่มีอาการท้องเสียหรืออาการอันตรายอื่นๆ เกิดขึ้น และปริมาณที่ได้ทั้ง 2 ระดับนั้น เป็นปริมาณที่สามารถทนต่อการย่อยได้ดี นอกจากนี้ มีการศึกษาที่แสดงถึงการบริโภคใยอาหารที่ละลายน้ำได้ในปริมาณ 100 กรัม แล้วไม่ก่อให้เกิดความผิดปกติของทางเดินอาหารอย่างรุนแรง (Vermorel et al., 2004) เนื่องจากมีความก้าวหน้าในการปรับตัวและกระจายการได้รับเป็นทหครั้งในปริมาณที่เท่าๆ กันต่อวัน มีเพียงแต่แก๊สที่มากเกินไปเกิดขึ้นในกระเพาะหลังจากที่ได้รับในปริมาณที่มากกว่า 50 กรัม/วัน เท่านั้น

2.2.3 ไพรโรเดกซ์ตริน

ไพรโรเดกซ์ตรินถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น เป็นสารให้ความหวาน เป็นสารปรุงแต่ง เป็นตัวเชื่อม และเป็นแคปซูล (encapsulation agent) (Laurentin et al., 2003) ไพรโรเดกซ์ตรินสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ British gums white dextrin และ yellow dextrins (BeMiller, 1993; Tomasik et al., 1989; Wurzburg, 1995) Pyrodextrinization ประกอบด้วย การเกิดปฏิกิริยาเคมี 3 ขั้นตอน ดังนี้ 1) การย่อย (hydrolysis) 2) การจัดเรียงตัว (transglucosidation) และ 3) การเกิดพอลิเมอร์ใหม่ (repolymerization) (Wurzburg, 1995) กระบวนการย่อยจะส่วนของ reducing end จะกลายเป็นไกลโคซิล (glucosyl) ประจุบวก ทำให้โมเลกุลภายในสูญเสียน้ำ (dehydration) เกิดเป็น 1,6-anhydro- β -D-glucopyranose หรือ พันธะภายในโมเลกุลกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่ โดยเป็นการจัดเรียงกันแบบสุมของพันธะไกลโคไซด์ 1 \rightarrow 2, 1 \rightarrow 3, 1 \rightarrow 4 และ 1 \rightarrow 6 (Tomasik et al., 1989) นอกจากนี้ ในระหว่างกระบวนการกลูโคสจะจัดเรียงตัวโดยมีรูปแบบเป็น α -D-(1,4) และ α -D-(1,6)

กระบวนการ Pyroconversion หรือ Dextrinification เป็นการอบแห้งแบ่งโดยใช้อุณหภูมิสูง (Laurentin et al., 2003) โดยแบ่งที่ใช้จะมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 5% จากนั้นจะเติมกรดที่สามารถใช้ได้กับอาหารลงไป กระบวนการ pyroconversion จะเกิดเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง จากนั้นเดกซ์ตรินที่ผลิตได้จะถูกทำให้เย็นอย่างรวดเร็ว โมเลกุลของแป้งจะถูกย่อยแบบสุมด้วยกรดและการให้ความร้อนสูงเพื่อให้ได้เป็นโอลิโกแซ็กคาไรด์สายสั้นๆ ซึ่งจะกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่ในระหว่างการทำให้เย็น ดังนั้น นอกจากการย่อยพันธะไกลโคไซด์ของแป้งที่ตำแหน่ง α -1,4 และ α -1,6 แล้ว ยังมีการสร้างพันธะใหม่ที่ไม่สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์ในร่างมนุษย์ได้ ได้แก่ β -1,4, β -1,6 และ β -1,3, β -1,2 (Ohkuma และ คณะ 1994) ดังนั้นเดกซ์ตรินต้านทาน (resistant dextrin) ถือเป็นเดกซ์ตรินที่มีกิ่งก้านสูงทำให้มีความสามารถในการละลายสูงและแสดงคุณสมบัติเชิงหน้าที่เหมือนกับใยอาหาร

การผลิตเดกซ์ตรินที่ใช้ในอาหารโดยทั่วไปจะประกอบด้วยกระบวนการ dextrinization ตามด้วยการทำบริสุทธิ์ด้วยการใช้ active carbon และ exchange resin ซึ่งเป็นการทำบริสุทธิ์ก่อนกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยต่อไป ลักษณะทางโครงสร้างของเม็ดแป้งก็มีส่วนสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ จากการศึกษาของ Fannon และคณะ (1992) โดยใช้เทคนิคของกล้องจุลทรรศน์ พบว่าบนพื้นผิวของเม็ดแป้งจะมีรูพรุนปรากฏอยู่ ความเป็นรูพรุนของเม็ดแป้งมีบทบาทสำคัญในหลายๆ ปรากฏการณ์ เช่น การดูดซับน้ำ การนำความร้อน การแพร่ของน้ำ และยังมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติเชิงกลและลักษณะเนื้อสัมผัส (Rahman, 2001) แป้งที่มีรูพรุนจะถูกใช้เป็นตัวดูดซับสารระเหยพวก เปปไทด์ โปรตีน เอนไซม์ และจุลินทรีย์ (Forsell et al., 1999; Kobayashi, Miwa, & Suzuki, 1992; Myllarinen et al., 1999; Zeller, Saleeb, & Ludescher, 1999) U. Uthumporn และคณะ (2010) ศึกษาลักษณะเม็ดแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลังด้วย Scanning electron microscopy (SEM) พบว่า เม็ดแป้งข้าวโพดมีรูพรุนบนผิวหน้าโดยธรรมชาติในขณะที่เม็ดแป้งมันสำปะหลังนั้นไม่ปรากฏรูพรุน ดังนั้น แป้งข้าวโพดจึงมีความไวต่อการทำปฏิกิริยาต่างๆ มากกว่าแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากสารเคมีสามารถแพร่ผ่านทางรูพรุนเข้าไปทำปฏิกิริยาภายในได้ดีกว่า และพื้นที่ในการทำปฏิกิริยายังมีมากกว่า แต่เมื่อนำแป้งทั้งสองไปย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสและกลูโคอะมิเลส พบว่า แป้งทั้งสองมีความเป็นรูพรุนมากขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Youshuang Chen และคณะ (2011) ซึ่งใช้เอนไซม์แอลฟาอะมิเลสและกลูโคอะมิเลสย่อยแป้งมันสำปะหลังเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้น การทำให้แป้งมีรูพรุนเพื่อเพิ่มความสามารถและคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ นอกจากจะใช้เอนไซม์แล้วยังสามารถใช้สารเคมี เช่น กรด หรือ ใช้แรงทางกล เช่น การบด การไม่ ได้ อีกด้วย

Commission of The European Communities (2008) ได้ให้คำจำกัดความของไฟโรเดกซ์ตรินไว้ว่า เป็น “พอลิเมอร์ของคาร์โบไฮเดรตที่ต่อกันด้วยมอนอเมอร์ที่มากกว่า 3 หน่วยขึ้นไป โดยไม่ถูกย่อยและไม่ถูกดูดซึมบริเวณลำไส้เล็ก” ดังนั้น ไฟโรเดกซ์ตรินจึงเป็นที่ยอมรับว่าเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพชนิดใหม่ซึ่งเป็นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ (soluble dietary fiber) ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ถูกเรียกว่า เดกซ์ตรินต้านทานการย่อย (resistant dextrin) ซึ่งพบว่าสามารถช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตของ *Bifidobacterium species* ในลำไส้ใหญ่ของมนุษย์ และยังทนต่อการถูกย่อยในบริเวณระบบย่อยอาหารส่วนบน ทั้งยังสามารถปรับสภาวะแวดล้อมให้ไม่เหมาะสมต่อการเจริญของพวกจุลินทรีย์ก่อโรค (Binder et al, 2005) ไฟโรเดกซ์ตรินแสดงคุณสมบัติที่เหมือนกับใยอาหาร (dietary fiber) และมีลักษณะทางกายภาพที่สามารถอุ้มน้ำได้ดีคล้ายกับ guar gum ที่จะช่วยเพิ่มปริมาณน้ำในอุจจาระ สามารถป้องกันโรคที่เกิดจากการอักเสบของปลายลำไส้ใหญ่ ช่วยป้องกันอาการท้องผูก และริดสีดวงทวารหนัก (Slavin et al., 2009) จากการศึกษาของ Roberfroide ในปี 1999 พบว่า resistant dextrin ให้พลังงานเพียง 1.7 กิโลแคลอรี/กรัม นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลเชิงบวกที่เกิดขึ้นเมื่อบริโภคคาร์โบไฮเดรตที่ถูกย่อยได้ต่ำต่อการใช้พลังงานในชีวิตประจำวันกับอาสาสมัคร (Sinaud et al., 2002) พบว่า ใยอาหารที่ละลายในน้ำมีผลเชิงบวกกับการใช้พลังงานในชีวิตประจำวันผ่านทางกระบวนการหมักของลำไส้ใหญ่ และการเปลี่ยนแปลงของการไหลของอาหาร

ในลำไส้ ผลเชิงบวกที่เพิ่มขึ้นถูกอธิบายโดยการเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้นของระบบทางเดินอาหาร การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักเนื้อเยื่อในการย่อย และการใช้พลังงานของกรดไขมันสายสั้นที่ต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับกลูโคส ปัจจัยเหล่านี้ให้ผลบวกของการเปลี่ยนแปลงในการทดสอบกับสัตว์ทดลอง (Vermeulen et al., 2004)

2.2.4 การลดขนาดโมเลกุลแป้งโดยการใช้กรด

การย่อยแป้งด้วยกรดถูกใช้ในการตัดแปรร่วมแป้ง และใช้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถละลายน้ำได้ (Soluble starch) การนำแป้งมาย่อยด้วยกรดซัลฟูริก จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า Nageli amylopectin (Nageli, 1874) ซึ่งเม็ดแป้งจะมีขนาดเล็กและมีโครงสร้างกิ่งมากขึ้น ส่วนการย่อยแป้งด้วยกรดไฮโดรคลอริกจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า Lintnerized starch (Lintner, 1886) ความแตกต่างของอัตราเร็วและบริเวณของการถูกย่อย ระหว่างแป้งจากธัญพืช พืชหัว และพืชตระกูลถั่ว เป็นผลมาจากความแตกต่างของขนาดของเม็ดแป้ง (Jane et al., 1997; Singh & Ali, 2000; Vasanthan & Bhatta, 1996) บริเวณของสายโซ่ของแป้งที่มีปฏิสัมพันธ์ภายในระหว่างบริเวณอสัณฐานและบริเวณผลึกของเม็ดแป้ง (Hoover & Vasanthan, 1993) ปริมาณของ phosphorylation (Jane et al., 1997) จำนวนของพันธะ α -1,6 (Inou-chi et al. 1987) และการกระจายของ α -1,6 บริเวณอสัณฐานผลึก (Jane et al. 1997) นอกจากนี้การย่อยสลายด้วยกรดยังมีผลต่อจำนวนของรูที่เกิดขึ้นบนผิวของเม็ดแป้ง (Jayakody & Hoover, 2002) French (1984) และ Kainuma & French (1971) ได้เสนอ 2 สมมติฐาน ที่จะอธิบายเกี่ยวกับอัตราการย่อยที่เกิดขึ้นซ้ำที่บริเวณผลึกของเม็ดแป้งไว้ว่า ภายในผลึกของเม็ดแป้งมีการจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นของสายโซ่ของแป้ง จึงไม่ยอมให้ H_3O^+ ผ่านเข้าไปในโมเลกุลได้ง่าย และการเปลี่ยนแปลงของ chair \rightarrow half chair จะเกิดขึ้นซ้ำมากเนื่องจากโครงสร้างของน้ำตาลภายในผลึกของแป้งถูกทำให้เคลื่อนที่

กระบวนการย่อยแป้งทำโดยการนำกรดที่สามารถใช้ได้ในการมาเติมและกวนผสมในสารละลายน้ำแป้ง (36-40 % ของแห้ง) ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิของการเกิดเจลปกติจะอยู่ในช่วง 40-60 °C เมื่อได้ระดับการย่อยที่ต้องการแล้ว สารละลายจะถูกทำให้เป็นกลางและกำจัดน้ำออกเพื่อให้เหลือแต่เม็ดแป้ง โดยการปั่นเหวี่ยง กรอง ล้างและนำไปทำแห้ง โดยปกติกรดจะเป็นตัวกระตุ้นในการย่อยของพันธะไกลโคไซด์ การย่อยจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในส่วนโครงสร้างที่ไม่จัดเรียงตัวกันแน่นในส่วนอสัณฐาน และการย่อยจะเกิดขึ้นได้น้อยในส่วนผลึกที่มีการจัดเรียงสายโซ่เป็นระเบียบอย่างหนาแน่น (Wurzburg, 1995) การศึกษาการย่อยแป้งของ Chabot, Allen, and Hood (1978) ได้แสดงให้เห็นว่า การย่อยแป้งนั้นจะเกิดรูปแบบที่แตกต่างกัน 2 รูปแบบคือ exo-corrosion โดยการย่อยจะเกิดบริเวณผิวนอกของเม็ดแป้งเข้าไปด้านใน (outside-in หรือ centripetal hydrolysis pattern) และ endo-corrosion ซึ่งการย่อยจะเกิดจากด้านในจากบริเวณตรงกลางหรือในส่วนของ hilum ออกไปด้านนอกในแนวรัศมี (inside-out หรือ centrifugal hydrolysis pattern) การย่อยแบบหลังนี้จะเกิดขึ้นได้ง่ายเนื่องจากเม็ดแป้งมีรูโดยธรรมชาติอยู่แล้ว

Atichokudomchai และคณะ (2000) ได้ทำการศึกษา คุณสมบัติทางสัณฐานวิทยาของการตัดแปรร่วมแป้งมันสำปะหลังด้วยการใช้กรดไฮโดรคลอริก 6% ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12-768

ชั่วโมง โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ amylose และการใช้ SEM พบว่า เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ปริมาณ amylose จะลดลง และบริเวณผลึกจะเพิ่มขึ้นเนื่องจาก กรดจะเข้าไปทำลายบริเวณอสัณฐาน ทำให้ได้บริเวณผลึกที่สูงขึ้น เมื่อกรดเข้าทำปฏิกิริยากับเม็ดแป้ง ผิวชั้นนอกจะถูกกัดกร่อนและมีลักษณะที่ขรุขระ เมื่อผิวชั้นนอกถูกกัดกร่อนออกไปจนหมด จะสังเกตเห็นผิวที่เรียบของชั้นถัดมา และเมื่อการย่อยดำเนินต่อไปเรื่อยๆ ผิวชั้นถัดมาก็ถูกกัดกร่อนอีกเช่นกัน ส่วนเม็ดแป้งที่ถูกย่อยที่เวลาแตกต่างกันเมื่อนำไปทำแห้งแบบพ่นฝอยแล้ว พบว่าลักษณะของเม็ดแป้งไม่แตกต่างไปจากเดิม

การย่อยแป้งมันฝรั่งด้วยกรดไฮโดรคลอริก 2.2 N จะเกิดขึ้นการย่อยแบบสองขั้นตอน ขั้นตอนการย่อยที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะเกิดในช่วงเริ่มต้นของการย่อย ซึ่งจะเกิดที่บริเวณอสัณฐานของเม็ดแป้ง ตามด้วยการย่อยที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ในขั้นที่สอง ซึ่งจะเกิดที่บริเวณผลึกของเม็ดแป้ง (Robin et al., 1974) รูปแบบการเกิดย่อยที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะเหมือนกับการย่อยที่เกิดขึ้นในแป้งจากธัญพืชและแป้งตระกูลถั่ว (Hoover & Vasanthan, 1994; Inouchi et al., 1987; Jane et al., 1997; Vasanthan & Bhatta, 1996)

2.2.5 การย่อยแป้งด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสและกลูโคอะมิเลส

เอนไซม์ที่สามารถย่อยแป้งได้มีมากมาย เช่น เอนไซม์แอลฟาอะมิเลส, เบต้าอะมิเลส, กลูโคอะมิเลส, พูลูลาเนส, ไอโซอะมิเลส เป็นต้น ซึ่งมีอยู่ในพืช สัตว์ และจุลินทรีย์ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับสารตั้งต้น และการทำงานของเอนไซม์แต่ละชนิด

เอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (α -amylase, E.C.3.2.1.1) หรือที่เรียกว่า α -D-(1,4)-glucan-4-gluconohydrolase สามารถสกัดได้จากสัตว์, พืช และจุลินทรีย์ ซึ่งในสัตว์ เอนไซม์ชนิดนี้จะอยู่ในน้ำลาย และตับ มีประโยชน์ในการย่อยแป้งในอาหาร ส่วนในตับจะช่วยสลายไกลโคเจนในเนื้อเยื่อ เอนไซม์นี้ถ้าพบในเมล็ดพืชเมื่อเมล็ดมีการเติบโตหรือการงอกจะมีประโยชน์ในกระบวนการทำมอลต์ติง (malting) การผลิตเครื่องดื่ม การทำขนมปัง ในพวกจุลชีพก็สามารถผลิตเอนไซม์นี้มาใช้ในอุตสาหกรรมได้ เช่นกัน ส่วนเอนไซม์กลูโคอะมิเลส (glucoamylase, E.C.3.2.1.3) มีชื่อเรียกหลายชื่อ คือ แกมมาอะมิเลส (γ -amylase), กลูคามิเลส (glucamylase) (Radley, 1968) เอนไซม์นี้สามารถย่อยแป้งได้โดยเริ่มจากปลายที่ไม่มีน้ำตาลรีดิวซ์ (non-reducing end) และสามารถย่อยได้ทั้งพันธะ $\alpha,1 \rightarrow 4$, $\alpha,1 \rightarrow 6$ และ $\alpha,1 \rightarrow 3$ glycosidic ซึ่งอัตราเร็วในการย่อยจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสารตั้งต้น (Rose, 1980) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อย คือ น้ำตาลกลูโคสและมอลโตสเพียงเล็กน้อย (Radley, 1968)

การนำเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสและกลูโคอะมิเลส มาช่วยในการตัดแปลงโครงสร้างของเม็ดแป้งให้เป็นรูพรุนนั้นมีการศึกษาโดยวิธีที่แตกต่างกันไปมากมาย ซึ่งรูพรุนจะเกิดขึ้นในระหว่าง การย่อยด้วยเอนไซม์ และรูที่เกิดขึ้นจะมีการกระจายตัวแบบสุ่มที่ผิวของเม็ดแป้งเมื่อตรวจสอบโดยใช้เทคนิคของกล้องจุลทรรศน์ ส่วนปริมาตร ขนาด และรูปร่างของรูพรุนนั้นเป็นตัวแปรที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ และการซึมผ่านของสารเข้าไปภายในเม็ดแป้งที่แตกต่างกัน (Apinan et al.,

2007; Baldwin, Adler, Davies, & Melia, 1994; Baldwin, Davies, & Melia, 1997; Baldwin, Adler, Davies, & Melia, 1998; Castro & Aguilera, 2007; Zhao)

การศึกษาของ Leloup และคณะ (1990) พบว่า การเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์นั้นมีหลายขั้นตอน คือ 1) การแพร่ไปยังพื้นผิวที่เป็นของแข็ง 2) การดูดซับของเอนไซม์ และ 3) การเกิดการเร่งปฏิกิริยา ซึ่งขั้นตอนการดูดซับเป็นสิ่งจำเป็นก่อนที่จะเกิดกิจกรรมการเร่งปฏิกิริยาที่ตามมา

การศึกษาของ Youshuang และคณะ (2011) ได้ทำการเตรียมแป้งในไซเดียมอะซิเตรทบัฟเฟอร์ pH 4.5 ย่อยโดยใช้เอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับกลูโคอะมิเลส ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง พบว่า เม็ดแป้งถูกกัดกร่อนและมีรอยแตกเป็นจำนวนมาก การกัดกร่อนโดยการย่อยของเอนไซม์จะเกิดที่บริเวณผิวหน้าเป็นหลัก และมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น 10.7 เท่าของแป้งดิบ (native starch) บริเวณออสันฐานจะถูกย่อยมากที่สุดและมีการเพิ่มขึ้นของผลึกในเม็ดแป้งเมื่อตรวจสอบด้วย XRD นอกจากนี้ การใช้เอนไซม์ร่วมกันยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยแป้ง สามารถทำปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิต่ำ ลดพลังงานในการให้ความร้อน และเกิดรูพรุนสูง (Uthumporn, 2010)

2.2.6 การลดขนาดด้วยบอลมิลล์ (Ball milling)

บอลมิลล์เป็นวิธีการตัดแปรทางกลที่ทำให้เม็ดแป้งมีขนาดเล็กลง โดนาตีย์หลักการของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางทำให้ลูกเซรามิกบอลหรือเม็ด Glass Bead เกิดการเคลื่อนที่หรือเสียดสีเข้ากับเม็ดแป้ง จนทำให้พื้นผิวเม็ดแป้งเกิดรอยแตกร้าวและแตกออกจนกลายเป็นอนุภาคของแป้งที่มีขนาดเล็กลง มีขั้นตอนการทำงานที่ไม่ซับซ้อน การตัดแปรแป้งด้วยวิธีนี้ใช้ในแป้งหลายชนิด เช่น แป้งสาลี ข้าวโพด มันฝรั่ง เป็นต้น (Jane et al., 1992; Lim et al., 1992; Daniel & Whistler, 1990; Griffin, 1989) การลดขนาดด้วยบอลมิลล์ที่ระดับแรงกระแทกต่ำ พบความเสียหายบริเวณผิวหน้าของเม็ดแป้งและพื้นผิวมีลักษณะหยาบและขรุขระ (Chen, Lii, & Lu, 2003)

Chulkyoon (1991) ได้ทำการศึกษาผลของสายพันธุ์แป้งสาลีที่มีผลต่อการลดขนาดด้วยบอลมิลล์ โดยใช้แป้ง 300 กรัม เป็นเวลา 2-24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง พบว่า ระดับการถูกทำลายของเม็ดแป้งขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น สายพันธุ์ ปริมาณความชื้น พื้นที่ผิวของการลดขนาด อัตราเร็วของการลดขนาด เป็นต้น นอกจากนี้เมื่อทดสอบสมบัติการพองตัวและร้อยละของการละลาย พบว่ามีค่าสูงขึ้นตามระดับการถูกทำลายที่เพิ่มขึ้น

Jane (1992) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเม็ดแป้งข้าวโพด โดยเม็ดแป้งข้าวโพดดิบจะสามารถต้านทานต่อแรงทางกล โดยเมื่อถูกลดขนาดด้วยบอลมิลล์เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จะยังคงปรากฏลักษณะของเม็ดแป้งปกติอยู่และไม่ถูกทำลายจนกลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลและภายในโมเลกุลของอะมิเลสและอะมิโลเพคติน ซึ่งเมื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงด้วยเครื่อง SEM พบว่าอนุภาคแป้งข้าวโพดจะมีขนาดเล็กลงและยังคงมีสมบัติของ Birefringence เหมือนกันที่พบในแป้งดิบ เมื่อศึกษาด้วยกล้อง Polarized light micrographs แต่ลักษณะของ Maltase Cross ของอนุภาคแป้งที่มีขนาดเล็กจะสูญเสียไปบ้างเนื่องจากผลของการสูญเสียลักษณะที่สมมาตรของรูปร่างปกติของเม็ดแป้งไป

Morrison และคณะ (1994) ศึกษาสมบัติของเม็ดแป้งที่ถูกทำลายโดยศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของผลึก การจัดเรียงโมเลกุล และการเกิดเจล ของแป้งที่ผ่านการทำบอลมิลล์ จะมีผลทำให้สูญเสียการจัดเรียงตัวโดยเกิดเป็นส่วนของอสัณฐานที่มีการจัดเรียงตัวขึ้นใหม่ทั้งหมด และมักจะมี ความแตกต่างจากส่วนของอสัณฐานของเม็ดแป้งดิบ มักจะไม่พบรูปผลึกอะมิโลเพคติน และไม่พบอะมิโลเพคตินที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ แต่จะพบในรูปของ Lipid amylose complex และ Lipid free amylose ในสัดส่วนที่สูงกว่าองค์ประกอบอื่นๆ ภายในเม็ดแป้ง จึงส่งผลให้เกิดข้อจำกัดในเรื่อง ความสามารถในการพองตัวและความสามารถในการละลายน้ำได้ต่ำ รวมถึงทำให้เอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยาได้ยาก ในทางตรงกันข้าม ส่วน อสัณฐานของแป้งที่ถูกทำลายจะมีการจัดเรียงตัวขึ้นใหม่ โดยจะมีปริมาณของ Lipid amylose complex และ Lipid free amylose เท่ากับที่พบในเม็ดแป้งดิบ แต่จะมีส่วนของอะมิโลเพคตินที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งสามารถพองตัวได้ดีในน้ำ เย็นและเอนไซม์สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น Sanguanpongj และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษา การลดขนาดแป้งมันสำปะหลังโดยใช้วิธีทางกล คือ บอลมิลล์ ร่วมกับการใช้กรดและเอนไซม์ปรับสภาพแป้งก่อนที่จะทำบอลมิลล์ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการลดขนาดและกำจัดส่วนของชั้น อสัณฐาน (amorphous lamellae) ออกไป ปริมาณอะมิโลสและอะมิโลเพคตินมีการเปลี่ยนแปลง จากการถูกย่อยโดยเอนไซม์อย่างมีนัยสำคัญภายในผลึกของเม็ดแป้ง แต่การย่อยโดยเอนไซม์ก็ยังมี ประสิทธิภาพต่ำเมื่อนำไปลดขนาดโดยบอลมิลล์ แม้ว่าบางส่วนของผลึกจะถูกทำลายไปแล้ว ในทางตรงกันข้ามการย่อยด้วยกรดจะเจาะจงและกัดกร่อนเข้าสู่ภายในได้มากกว่า และทำลายส่วน amorphous lamellae เป็นหลัก และยังแสดงลักษณะของผลึกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังถูกทำให้แตกหักได้ง่ายเมื่อนำไปลดขนาดโดยบอลมิลล์ การย่อยแป้งโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกร่วมกับบอลมิลล์ จะได้ขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังอยู่ในช่วง 3-8 ไมโครเมตร (แต่แป้งดิบมีขนาด 3-30 ไมโครเมตร) การกำจัดส่วนของอสัณฐานของเม็ดแป้งก่อนที่จะนำไปลดขนาดด้วยบอลมิลล์ จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการลดขนาดของเม็ดแป้งมากขึ้น

บทที่ 3

วัสดุและวิธีการวิจัย

3.1 วัสดุทดลอง

3.1.1 แป้งมันสำปะหลัง (cassava starch) ได้รับการอุดหนุนจาก บริษัท เซวานต์ดี สตาร์ช 2004 จำกัด จังหวัดนครราชสีมา

3.1.2 เอนไซม์

3.1.2.1 เอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (α -amylase) (EC 3.2.1.1) ที่ผลิตจากเชื้อ *Bacillus licheniformis* (Sigma-Aldrich, USA)

3.1.2.2 เอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (amylglucosidase) (EC 3.2.1.3) ที่ผลิตจากเชื้อ *Aspergillus niger* (Sigma-Aldrich, USA)

3.2 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโยอาหารละลายน้ำ

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโยอาหารละลายน้ำหรือไพโรเดกซ์ทริน โดยศึกษาผลของอุณหภูมิ ความชื้น ความเข้มข้นของกรดและระยะเวลาต่อการเกิดปฏิกิริยา pyroconversion ดัดแปลงตามวิธีของ Laurentin และคณะ (2003), Mc Clain (2009) และ Campechano และคณะ (2007) โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2.2 และ 3.2 โมลาร์ ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร แล้วผสมกับแป้งมันสำปะหลังดิบความชื้น 4–6% จำนวน 22 กรัม ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง จากนั้นนำไปให้ความร้อนในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 และ 3 ชั่วโมง แล้วนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ โดยเตรียมตัวอย่างที่ไม่ได้เติมกรดไฮโดรคลอริกเป็นตัวควบคุม

3.3 การตรวจสอบสมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์โยอาหารละลายน้ำ

3.3.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางความหนืด

วิเคราะห์ค่าความหนืดของตัวอย่าง ดัดแปลงตามวิธีของ Bello-Perez et al. (2001) ซึ่งวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Brookfield DV-II ใช้สารละลายตัวอย่างความเข้มข้น 6% ต่อน้ำหนักแห้ง โดยวัดตัวอย่างที่ละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที และอุณหภูมิน้ำเดือด เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ความหนืด

3.3.2 การวิเคราะห์สี

การวิเคราะห์สีจะวิเคราะห์ความแตกต่างของสีเปรียบเทียบกันระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับไพโรเดกซ์ทรินหรือโยอาหารที่ผลิตได้ โดยใช้เครื่องวัดสี Minolta ซึ่งระบบวัดสี จะวัดค่าเป็นสามคุณสมบัติ: L (สีขาว = 100, สีดำ = 0), a (สีแดง = +, สีเขียว = -) และ b (สีเหลือง = +, สีฟ้า = -) จากนั้นนำค่าทั้ง 3 คุณสมบัติที่วัดได้มาคำนวณหา ค่าความขาว (Whiteness, W) ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ค่าความขาว (Whiteness, W)} = [(L)^2 + (-a)^2 + (b)^2]^{1/2}$$

3.3.3 การวิเคราะห์ความสามารถในการละลายน้ำ

วิเคราะห์ความสามารถในการละลายน้ำโดยดัดแปลงตามวิธีการของ Schoch, T. J. (1964) โดยละลายไพโรเดกซ์ทรินหรือโยอาหารที่ผลิตได้ในน้ำให้มีความเข้มข้น 10% โดยละลายที่อุณหภูมิห้องและในน้ำเดือดเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำมาทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง สารละลายที่ได้ไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3000xg เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำของเหลวที่ได้ไปทำแห้งในตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง และ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วคำนวณความสามารถในการละลายน้ำดังนี้

$$\% \text{ การละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักแห้งของตัวอย่างหลังอบ} \times 100}{\text{น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น}}$$

3.3.4 การวิเคราะห์ความขุ่นของสารละลาย

ความขุ่นของสารละลายวิเคราะห์ตามวิธีของ Bello-Perez และคณะ (2001) โดยวิเคราะห์เป็นค่าการส่องผ่าน (Transmittance: %T) ของสารละลายที่มีความเข้มข้น 1% (w/v) โดยละลายที่อุณหภูมิห้องและในน้ำเดือดเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำมาทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปวัดความขุ่นโดยใช้เครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร

3.3.5 การวิเคราะห์ปริมาณ Available starch (AS)

วิเคราะห์ปริมาณแป้งทั้งหมด ดัดแปลงตามวิธีการของ Megazyme 2009 โดยละลายตัวอย่างในสารละลาย KOH ความเข้มข้น 2 โมลาร์ จากนั้นย่อยด้วยเอนไซม์ α -amylase heat stable และเอนไซม์ amyloglucosidase ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่ถูกปลดปล่อยออกมา (available starch, AS) ด้วยสารละลาย PGO เอนไซม์ และคำนวณหาปริมาณ AS

3.4 การลดขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังด้วยกรด เอนไซม์ และเครื่องบดมิลล์

3.4.1 การลดขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังโดยการใช้กรด

การลดขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังด้วยกรด ทำการเตรียมโดยดัดแปลงจากวิธีการของ Sanguanpong et al. (2003) โดยเตรียมสตาร์ชมันสำปะหลังความเข้มข้น 30% (w/w) ในสารละลาย HCl 2.2 M จากนั้นนำไปปั่นในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 55 องศาเซลเซียส และเขย่าที่ความเร็ว 180 รอบ/นาที ตลอดเวลา เป็นเวลา 0 - 6 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างทุกๆ ชั่วโมง นำมาวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดด้วยวิธี phenol-sulfuric acid (Dubois et al., 1956) เมื่อครบ 6 ชั่วโมง กรองเอาสารละลายกรดออกจากตัวอย่าง ล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งสารละลายตัวอย่างมี pH 6.5 และนำไปทำแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิเข้า 160 องศาเซลเซียส อุณหภูมิขาออก 50 - 60 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของสตาร์ช 10% (w/w) ซึ่งดัดแปลงตามวิธีของ Atichokudomchai et al. (2000) เก็บตัวอย่างในภาชนะปิดสนิทที่อุณหภูมิห้อง เพื่อรอวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ต่อไป

3.4.2 การลดขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังโดยการใช้เอนไซม์

การลดขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ทั้งแบบเดี่ยวและแบบผสม ทำการเตรียมโดยดัดแปลงตามวิธีของ Sanguanpong et al. (2003) ซึ่งการย่อยสตาร์ชโดยใช้เอนไซม์แบบเดี่ยว คือย่อยสตาร์ชโดยใช้เอนไซม์แอลฟาอะมิเลส หรือเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียง

อย่างเดียว และการย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์แบบผสม คือ การย่อยสลายด้วยเอนไซม์ผสมระหว่างเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสและเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสร่วมกัน โดยเตรียมสตาร์ชมันสำปะหลังความเข้มข้น 30% (w/w) ในโซเดียมอะซิเตทบัฟเฟอร์ (pH 4.5) จากนั้นย่อยสลายด้วยการเติมเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (เตรียมให้มีกิจกรรมของเอนไซม์ 120 ยูนิต/มิลลิลิตร) เพียงอย่างเดียว หรือย่อยสลายด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (เตรียมให้มีกิจกรรมของเอนไซม์ 300 ยูนิต/มิลลิลิตร) เพียงอย่างเดียว และย่อยสลายด้วยเอนไซม์ผสมระหว่างเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสและเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส ที่เตรียมให้มีกิจกรรมของเอนไซม์ 120 ยูนิต/มิลลิลิตร และ 300 ยูนิต/มิลลิลิตร ตามลำดับ โดยใช้ความเข้มข้นของแต่ละเอนไซม์ 3 % (w/w) โดยน้ำหนักสตาร์ชแห้ง จากนั้นนำสารละลายสตาร์ชไปต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 55 องศาเซลเซียส และเขย่าที่ความเร็ว 180 รอบ/นาที ตลอดเวลาเป็นเวลา 0 - 6 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างทุกๆ ชั่วโมง นำสารละลายตัวอย่างไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1500xg และนำส่วนใสไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด หลังจากนั้นหยุดปฏิกิริยาด้วยสารละลาย 2.2 M HCl ให้ได้ pH ประมาณ 1.5 - 1.6 เป็นเวลา 10 นาที กรองและล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งสารละลายตัวอย่างมี pH 6.5 นำไปทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยและเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องเพื่อนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ

3.4.3 การลดขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังโดยใช้กรดแล้วบดด้วยเครื่องบอล

มิลล์

การลดขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องบอลมิลล์ (Ball mill) ดัดแปลงตามวิธีของ Sanguanpong et al. (2003) โดยนำตัวอย่างสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง มาบดต่อด้วย ball mill โดยเตรียมสตาร์ชใน absolute ethyl alcohol ความเข้มข้นสตาร์ช 25% (w/v) ใส่ลงในหม้อบดขนาด 1 กิโลกรัม และบรรจุลูกบอลเซรามิก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ลงไปใน 50% ของปริมาตรหม้อบด เพื่อใช้บด และเดินเครื่องที่ความเร็วรอบ 56 รอบ/นาที เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง หลังจากครบเวลานำตัวอย่างไปทำแห้งที่อุณหภูมิห้อง เก็บตัวอย่างในภาชนะปิดสนิทที่อุณหภูมิห้อง เพื่อบริวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ต่อไป

3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเม็ดแป้งหลังถูกดัดแปรด้วยวิธีต่างๆ

3.5.1 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของสตาร์ชก่อนและหลังดัดแปร

ตรวจสอบลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของสตาร์ชก่อนและหลังดัดแปรด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูง (Field Emission Scanning electron microscopy; FE - SEM) (JSM 7800F, JEOL LTD., USA) ที่กำลังขยาย 1,000, 6,000 และ 30,000 เท่า เตรียมตัวอย่างโดยติดกาวสองหน้าลงบนด้านหนึ่งของ stub ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร โรยตัวอย่างบาง ๆ ลงบน stub แล้วฉาบทองด้วยเครื่อง sputter coater (JEOL Smart Coater, JEOL LTD., USA)

3.5.2 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางผลึก ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)

ตรวจสอบรูปแบบผลึกและปริมาณผลึกของสตาร์ชก่อนและหลังการดัดแปรพื้นผิวด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (Bruker D2 PHASER, Bruker Corporation, Germany) ที่ใช้ $\text{CuK}\alpha 1$ เป็นแหล่งให้กำเนิดรังสีเอ็กซ์ โดยวัดในช่วงมุม (2θ) 5 – 35 องศา กำหนดกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ ศักย์ไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ step size 0.2 องศาต่ออนาที Alignment 0.02 องศา คำนวณปริมาณผลึก (relative crystallinity, (%)) โดยใช้ซอฟต์แวร์ TOPAS version 4.2 (Bruker Corporation, Germany)

3.5.3 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย

วิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเฉลี่ย (D_{50}) สตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังดัดแปรด้วยเครื่อง Diffraction Particle Size Analyzer (HORIBA LA - 950, HORIBA Ltd., Japan) อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของแสง โดยใช้เลเซอร์ชนิดแก๊สฮีเลียม – นีออน (He – Ne gas laser) เป็นแหล่งกำเนิดแสง ทดสอบแบบเปียก โดยกระจายตัวอย่างลงในเครื่อง ซึ่งบรรจุน้ำกลั่นไว้ เปิดระบบ ultrasonic เพื่อช่วยกระจายตัวอย่าง ระบุค่าดัชนีหักเหของสารที่ใช้กระจายตัวอย่าง โดยน้ำกลั่นมีค่าดัชนีหักเห 1.33 (Horiba Guidebook)

3.5.4 การวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนเฉลี่ย

วิเคราะห์โดยใช้หลักการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของรูพรุน (BELSORP – mini Π , BEL JAPAN, INC., Japan) จากนั้นนำข้อมูลไอโซเทิร์มการดูดซับที่ได้มาคำนวณเพื่อหาค่าของพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนเฉลี่ยโดยใช้ทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ขั้นตอนในการวิเคราะห์จะประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ การไล่แก๊สและสิ่งเจือปนออกจากพื้นผิวของตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างเข้าสู่ขั้นตอนการวัดการดูดซับแก๊ส โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้ ซึ่งหลอดบรรจุตัวอย่างและอุปกรณ์ประกอบที่อบไล่ความชื้นแล้ว และจดน้ำหนักที่แน่นอน บรรจุตัวอย่าง ประมาณ 0.27 – 0.28 กรัม ลงในหลอดบรรจุตัวอย่างและใส่อุปกรณ์ประกอบแล้วชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำหลอดที่บรรจุตัวอย่างเข้าเครื่องไล่แก๊ส โดยไล่แก๊สที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อไล่แก๊สเสร็จแล้ว ชั่งน้ำหนักหลอดที่บรรจุตัวอย่างหลังไล่แก๊ส บันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่เหลือหลังจากการไล่แก๊สลงในโปรแกรมตั้งค่าสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ให้เหมาะสมกับตัวอย่าง ติดตั้งหลอดบรรจุตัวอย่างเข้ากับเครื่องวิเคราะห์ ใส่นีโตรเจนเหลวปริมาณ 2 ลิตร ลงในเครื่อง จากนั้นจึงเริ่มวิเคราะห์ตัวอย่าง โดยกำหนดค่าความดันสัมพัทธ์สูงสุด 0.98 หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการวิเคราะห์ ระบบจะทำการบันทึกข้อมูลต่างของตัวอย่าง รวมถึงข้อมูลไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สไนโตรเจน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณค่าที่ต้องการด้วยซอฟต์แวร์ (BEL MASTERTM, BEL JAPAN, INC., Japan) ต่อไป

3.5.5 การวิเคราะห์สีของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปร

วัดสีของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรด้วยเครื่อง Hunter colorimeter (MiniScan EZ 4500L, HunterLab, USA) โดยแปรผลออกมาในระบบ CIE (Commission International de l'Eclairage) โดยวัดค่า L^* , a^* และ b^* เมื่อ $L^*=0$ มีสีดำ และ

$L^*=100$ มีสีขาว, $a^*=-a^*$ มีสีเขียว และ $a^*=+a^*$ มีสีแดง, $b^*=-b^*$ มีสีน้ำเงิน และ $b^*=+b^*$ มีสีเหลือง จากนั้นคำนวณค่าความขาวตามสมการ

$$\text{ค่าความขาว (Whiteness)} = 100 - [(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{1/2}$$

3.6 การเตรียมไฟโรเดกซ์ตริน (เดกซ์ตรินด้านทานการย่อย) จากแป้งมันสำปะหลังอนุภาคขนาดเล็ก

ดัดแปลงตามวิธีของ Laurentin et al. (2003), Mc Clain (2009) และ Campechano et al. (2007) โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2.2 โมลาร์ ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร แล้วผสมกับสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชที่ดัดแปรพื้นผิวที่เตรียมได้จาก ข้อ 2.4.1 – 2.4.3 ที่ความชื้น 4 - 6% จำนวน 22 กรัม เก็บในภาชนะปิดสนิทแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง จากนั้นนำไปให้ความร้อนในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ต่อไป

3.7 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของไฟโรเดกซ์ตริน (เดกซ์ตรินด้านทานการย่อย) จากแป้งมันสำปะหลังอนุภาคขนาดเล็ก

3.7.1 ลักษณะรูปร่างและพื้นผิว

ตรวจสอบลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของไฟโรเดกซ์ตรินหรือเดกซ์ตรินด้านทานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูง (Field Emission Scanning electron microscopy; FE - SEM) (JSM 7800F, JEOL LTD., Japan) ที่กำลังขยาย 1,000 และ 6,000 เท่า โดยเตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกับข้อ 3.5.1

3.7.2 ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึก

ใช้วิธีการเดียวกับ ข้อ 3.5.2

3.7.3 การวิเคราะห์สี

ใช้วิธีการเดียวกับ ข้อ 3.5.5

3.7.4 การวิเคราะห์ความสามารถในการละลายน้ำ

ใช้วิธีการเดียวกับ ข้อ 3.3.3

3.7.5 การวิเคราะห์ปริมาณใยอาหารทั้งหมด (Total Dietary Fiber; TDF)

การวิเคราะห์ปริมาณใยอาหารทั้งหมด วิเคราะห์ตามวิธีของ AOAC 2011.25 โดยชั่งตัวอย่าง 1.000 ± 0.005 กรัม ลงในขวดย่อยตัวอย่างขนาด 250 มิลลิลิตร บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน (ทำ 2 ซ้ำ) จากนั้นทำตัวอย่างให้เปียกโดยเติมแอลกอฮอล์ 95% ปริมาตร 1 มิลลิลิตรลงไปในตัวอย่าง แล้วเติมมาลิเอท บัฟเฟอร์ (ความเข้มข้น 50 มิลลิโมลาร์, pH 6.0 ที่ประกอบด้วย 2 มิลลิโมลาร์ แคลเซียมคลอไรด์ และ 0.02% โซเดียมเฮกซ์ตาฟอสเฟต) ปริมาตร 40 มิลลิลิตร ที่ประกอบด้วยเอนไซม์ แพนครีเอติก แอลฟาอะไมเลส (Pancreatic α -amylase, PPA) โดยเตรียมให้มีกิจกรรมของเอนไซม์ 50 ยูนิต/มิลลิลิตร และเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (Amyloglucosidase, AMG) โดยเตรียมให้มีกิจกรรมของเอนไซม์ 3.4 ยูนิต/มิลลิลิตร ลงในขวดย่อยตัวอย่างแต่ละขวด ปิดฝาแล้วนำไปบ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 37 องศาเซลเซียส และเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบ/ นาที เป็นเวลา 16 ชั่วโมง

เมื่อครบเวลาแล้วนำตัวอย่างมาปรับ pH ให้เป็น 8.2 (7.9 – 8.4) โดยเติมด้วย Trizma® base ความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ ปริมาตร 30 มิลลิลิตร แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 – 100 องศาเซลเซียส ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ โดยไม่ต้องเขย่าเป็นเวลา 20 นาที เพื่อหยุดปฏิกิริยาของเอนไซม์ หลังจากครบเวลาแล้ว นำตัวอย่างมาลดอุณหภูมิให้เหลือประมาณ 60 องศาเซลเซียส แล้วเติมเอนไซม์โปรตีเอส (protease) (50 มิลลิกรัม/ มิลลิลิตร, 350 Tyrosine ยูนิต์/ มิลลิลิตร) ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงไปในแต่ละตัวอย่าง แล้วนำไปต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบเวลา นำตัวอย่างออกมาเติมกรดอะซิติก ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 4 มิลลิลิตร เพื่อปรับ pH ให้ได้ประมาณ 4.3 แล้วเติม D – sorbital internal standard ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงไปในแต่ละตัวอย่าง ทั้งนี้เตรียม blank 2 ซ้ำ เช่นเดียวกับตัวอย่าง

เมื่อย่อยตัวอย่างด้วยเอนไซม์เรียบร้อยแล้ว นำมากรองผ่าน crucible ที่เตรียมไว้เพื่อกรองส่วนของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble Dietary fiber, IDF) และแป้งต้านทาน (Resistant Starch, RS) ไว้ใน crucible (นำ crucible ขนาด 50 มิลลิลิตร บรรจุ Celite 1 กรัม อบในตู้อบลมร้อนจนมีน้ำหนักที่แน่นอน แล้วบันทึกน้ำหนักที่แน่นอนไว้) โดยกระจาย Celite ให้ทั่ว crucible ที่ต่อเข้ากับชุดกรองและปั๊มดูดสูญญากาศ ด้วยแอลกอฮอล์ 78% ปริมาตร 15 มิลลิลิตร จากนั้นค่อย ๆ เทตัวอย่างลงไปใน crucible แล้วกลั้วขวดย่อยตัวอย่างด้วยน้ำปราศจากอิออนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ประมาณ 10 มิลลิลิตร แล้วใช้ spatula กวาดเอาตัวอย่างที่ติดอยู่ภายในขวดย่อยออกให้หมด จากนั้นกลั้วขวดย่อยด้วยน้ำปราศจากอิออนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ประมาณ 10 มิลลิลิตร อีกครั้ง แล้วเก็บสารละลายตัวอย่างที่ผ่านการกรองมาปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากอิออนให้มีปริมาตร 70 มิลลิลิตร แล้ววิเคราะห์หาปริมาณใยอาหารที่ละลายน้ำได้แต่ตกตะกอนใน 78% แอลกอฮอล์ (dietary fiber soluble in water but precipitated in 78% aqueous ethanol, SDFP) และใยอาหารที่ละลายน้ำได้แต่ไม่ตกตะกอนใน 78% แอลกอฮอล์ (dietary fiber soluble in water and not precipitated in 78% aqueous ethanol; SDFS) โดยนำสารละลายตัวอย่างที่ผ่านการกรองและปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากอิออน ปริมาตร 70 มิลลิลิตรแล้ว มาให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แล้วเติมแอลกอฮอล์ 95% ที่มีอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ปริมาตร 280 มิลลิลิตร ลงไปตัวอย่าง แล้วเขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 60 นาที จากนั้นนำมากรองผ่าน crucible เดิม ที่มีส่วนของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำอยู่ เมื่อกรองตัวอย่างแล้วกรองล้าง crucible ด้วย 78% แอลกอฮอล์ ปริมาตร 15 มิลลิลิตร 2 ครั้ง, 95% แอลกอฮอล์ ปริมาตร 15 มิลลิลิตร 1 ครั้ง และ อะซิโตน ปริมาตร 10 มิลลิลิตร 1 ครั้ง จากนั้น นำ crucible ไปทำแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน หรือจนกว่าจะได้น้ำหนักที่แน่นอน แล้วนำมาทำให้เย็นในตู้ดูดความชื้นประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณ IDF, RS และ SDFP หรือใยอาหารมวลโมเลกุลสูง (High Molecular Weight Dietary Fiber, HMWDF) ส่วน crucible ที่อบ

และชั่งน้ำหนักที่แน่นอนแล้ว นำ crucible ที่ 1 ไปวิเคราะห์หาปริมาณเถ้า และนำ crucible ที่ 2 ไปวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน

สารละลายที่ผ่านการกรอง ซึ่งเป็นส่วนของ SDFS หรือใยอาหารที่ละลายน้ำได้มวลโมเลกุลต่ำ (Low Molecular Weight Dietary Fiber, LMWDF) นั้น นำไประเหยด้วยเครื่องระเหยสูญญากาศเพื่อกำจัดแอลกอฮอล์ โดยระเหยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เมื่อระเหยแอลกอฮอล์ออกจนหมดแล้ว เติมน้ำที่ปราศจากไอออนลงไปในช่วงระเหยปริมาตร 5 มิลลิลิตร เขย่าขวดเป็นเวลา 2 นาที เพื่อละลายตัวอย่างออกจากขวดระเหย จากนั้นนำสารละลายตัวอย่างปริมาตร 2 มิลลิลิตร มากำจัดเกลือด้วยเรซินชนิด H^+ และ OH^- อย่างละ 4 กรัม ที่บรรจุในคอลัมน์ polypropylene ขนาด 20 มิลลิลิตร และล้างคอลัมน์ที่บรรจุเรซินทั้ง 2 ชนิดแล้ว ด้วยน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 20 มิลลิลิตร โดยควบคุมอัตราการไหลผ่านของน้ำล้างให้มีความเร็ว 1.0 มิลลิลิตร/นาที เมื่อเติมคอลัมน์เรซินแล้ว จึงเติมสารละลายตัวอย่างปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงไปในคอลัมน์ โดยควบคุมให้มีอัตราการไหลของสารละลายอยู่ที่ 1.0 มิลลิลิตร/นาที จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 20 มิลลิลิตร ลงในคอลัมน์ จากนั้นนำสารละลายที่ผ่านการกำจัดไอออนแล้วไประเหยเพื่อกำจัดน้ำออกด้วยเครื่องระเหยสูญญากาศ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และเมื่อระเหยเอาน้ำออกจนหมดแล้ว เติมน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงไปในขวดระเหย เขย่าขวดเป็นเวลา 2 นาที เพื่อชะเอาตัวอย่างที่ติดอยู่ในขวดระเหยออก จากนั้นนำสารละลายที่ได้มากรองด้วยเมมเบรนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.45 ไมครอน แล้วเก็บตัวอย่างลงในขวดแก้วขนาดเล็กเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC ต่อไป

เตรียมสารละลายกลูโคสมาตรฐานที่ 3 ความเข้มข้น (5, 10 และ 20 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร) และสารละลายมาตรฐาน Liquid Chromatography (LC) (Corn syrup solid ซึ่งเป็นสารที่ประกอบด้วยน้ำตาลโอลิโกแซ็กคาไรด์ ที่มีระดับการจัดเรียงพอลิเมอร์มากกว่า 3 หน่วยขึ้นไป, Matsutani Chemical Industry Co., Ltd., Japan) วิเคราะห์สารมาตรฐานและสารละลายตัวอย่างด้วยเครื่อง HPLC (Agilent 1260 Infinity LC Systems, Agilent Technologies, USA) โดยใช้คอลัมน์ LC (VertiSep™ Sugar ขนาด 6.5 x 300 mm) เป็นตัวแยกองค์ประกอบ โดยกำหนดอัตราเร็วในการวิเคราะห์ที่ 0.3 มิลลิลิตร/นาที และควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์ที่ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นคำนวณหาปริมาณใยอาหารตามสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Blank (B)} = \frac{BR_1 + BR_2}{2} - P_B - P_A$$

เมื่อ BR_1 และ BR_2 = น้ำหนักของของแข็งที่ค้างอยู่บน crucible ของการวิเคราะห์ซ้ำที่ 1 และ 2 หน่วยเป็นมิลลิกรัม

$$P_A = \text{ปริมาณโปรตีนของ Blank หน่วยเป็นมิลลิกรัม}$$

$$P_B = \text{ปริมาณเถ้าของ Blank หน่วยเป็นมิลลิกรัม}$$

$$\text{HMWDF} = \frac{\frac{R_1 + R_2}{2} - P_B - P_A - B}{\frac{M_1 + M_2}{2}} \times 100$$

เมื่อ R_1 = ตะกอนของตัวอย่างที่ค้างอยู่บน crucible ของการวิเคราะห์ตัวอย่างซ้ำที่ 1 หน่วยเป็นมิลลิกรัม

R_2 = ตะกอนของตัวอย่างที่ค้างอยู่บน crucible ของการวิเคราะห์ตัวอย่างซ้ำที่ 2 หน่วยเป็นมิลลิกรัม

M_1 = น้ำหนักตัวอย่างของการวิเคราะห์ซ้ำที่ 1 หน่วยเป็นมิลลิกรัม

M_2 = น้ำหนักตัวอย่างของการวิเคราะห์ซ้ำที่ 2 หน่วยเป็นมิลลิกรัม

P_A = ปริมาณของโปรตีนที่ได้จากการวิเคราะห์ R_1 หน่วยเป็นมิลลิกรัม

P_B = ปริมาณของโปรตีนที่ได้จากการวิเคราะห์ R_2 หน่วยเป็นมิลลิกรัม

SDFS = $R_f \times (W_t - IS) \times (PA - SDFS) / (PA - IS) \times (100 / M)$

เมื่อ R_f (Response factor) = $(PA - IS) / (PA - Glu) \times (W_t - Glu / W_t - IS)$

PA-IS = พื้นที่ใต้กราฟของ internal standard (D-sorbitol)

PA-Glu = พื้นที่ใต้กราฟของสารละลายกลูโคสมาตรฐาน

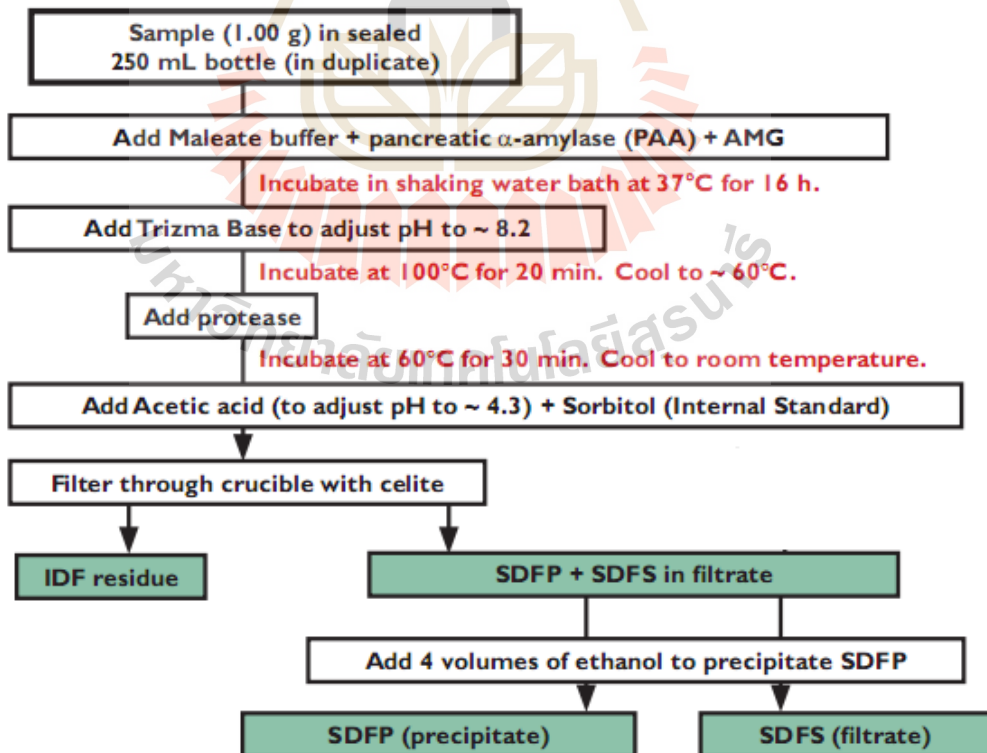
$W_t - Glu$ = น้ำหนักของกลูโคสมาตรฐาน

$W_t - IS$ = น้ำหนักของ internal standard

PA-SDFS = พื้นที่ใต้กราฟของตัวอย่าง

M = น้ำหนักของตัวอย่างที่ค้างอยู่บน crucible

TDF (%) = HMWDF (%) + SDFS (%)



ภาพที่ 3.1 แผนภาพหลักการการวิเคราะห์ปริมาณใยอาหารตามวิธีของ AOAC 2011.25 (ที่มา: AOAC 2011.25)

3.8 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) และวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล Analysis of Variance (ANOVA) ด้วยโปรแกรม SPSS 17.0 (SPSS Inc., Illinois, USA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple' Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)



บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโยอาหารละลายน้ำ (ไฟโรเดกซ์ตริน) และสมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์โยอาหารละลายน้ำ

การศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโยอาหารละลายน้ำได้หรือไฟโรเดกซ์ตริน โดยแปรผลของอุณหภูมิ ความชื้น ความเข้มข้นของกรด และระยะเวลาต่อการเกิดปฏิกิริยา pyroconversion ซึ่งเมื่อตรวจสอบสมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์โยอาหารละลายน้ำที่ผลิตได้พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความหนืด ความสามารถในการละลาย ความชุ่ม สี และปริมาณ Available starch (AS) แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสภาวะที่ทำการผลิต แสดงดังตารางที่ 4.1-4.3 และภาพที่ 4.1-4.5

4.1.1 ความหนืด

ผลการวิเคราะห์ความหนืดของไฟโรเดกซ์ตรินเมื่อละลายที่อุณหภูมิห้องและในน้ำ เด็ดพบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 4.1) เนื่องจากการใช้ความร้อนสูงร่วมกับการใช้กรดในการทำปฏิกิริยา pyrodextrinization มีผลต่อการลดลงของขนาดโมเลกุลแป้ง โดยกรดจะเข้าไปทำลายพันธะหลักของแป้ง คือ พันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง α -1,4 หลังจากนั้นจะเกิด reducing end กลายมาเป็น glucosyl cation โมเลกุลภายในจะเกิดการสูญเสีย น้ำ แล้วสร้างพันธะ 1,6 anhydro- β -D-glucose หรือเกิดพันธะใหม่ภายในโมเลกุล (transglucosidation) เช่น $1 \rightarrow 2$, $1 \rightarrow 3$, $1 \rightarrow 4$, และ $1 \rightarrow 6$ (β -monomer) เกิดเป็นโครงสร้างกิ่งขึ้น จากการศึกษาของ Laurentin และคณะปี 2003 ซึ่งได้นำไฟโรเดกซ์ตรินมาละลายน้ำและส่องกล้อง SEM พบว่าไฟโรเดกซ์ตรินสูญเสียความสามารถในการคงรูปร่างเป็นแกรนูล แต่จะกลายเป็นแผ่นที่แผ่ออก (flake) และไม่กลับมารวมตัวกัน จึงทำให้มีความหนืดไม่สูง ซึ่งเป็นผลดีหากนำไปเติมในผลิตภัณฑ์อาหาร เนื่องจากไม่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์

4.1.2 สี

เมื่อนำไฟโรเดกซ์ตรินที่ผลิตได้ไปวัดความขาว พบว่าอุณหภูมิและความเข้มข้นในการทำปฏิกิริยามีผลต่อความขาวของไฟโรเดกซ์ตรินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งไฟโรเดกซ์ตรินที่ผลิตในสภาวะที่ไม่มีกรดเป็นตัวกระตุ้นในการทำปฏิกิริยา (control) มีความขาวแตกต่างจากความขาวของแป้งมันสำปะหลังเริ่มต้นเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามความขาวจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ส่วนไฟโรเดกซ์ตรินที่มีการใช้กรดร่วมในการทำปฏิกิริยา เมื่อพิจารณาสภาวะในการทำปฏิกิริยาที่ 17 และ 18 ซึ่งใช้อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรดที่ 2.2 และ 3.2 โมลาร์ และใช้เวลา 3 ชั่วโมงในการทำปฏิกิริยา พบว่ามีความขาวต่ำที่สุด คือ 60.82 และ 60.23 ตามลำดับ เกิดสีเหลืองจนถึงสีน้ำตาลกับไฟโรเดกซ์ตริน

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนืดของแต่ละสภาวะในการทำปฏิกิริยา Pyrodextrinization

Condition	Temp. (°C)	[HCl] (M)	Time (h)	Viscosity (centipoises)	
				Room temp	100 °C
1	120	Control	1.5	1.33	1.00
2		2.2		1.00	1.00
3		3.2		1.00	0.50
4		Control	3.0	1.00	1.00
5		2.2		1.00	0.50
6		3.2		0.50	0.67
1	140	Control	1.5	1.00	1.17
2		2.2		1.00	0.50
3		3.2		1.00	0.50
4		Control	3.0	1.50	1.00
5		2.2		1.00	0.17
6		3.2		0.50	1.00
1	160	Control	1.5	0.50	1.00
2		2.2		1.00	1.00
3		3.2		1.00	0.50
4		Control	3.0	0.50	0.50
5		2.2		0.50	0.50
6		3.2		1.00	0.50

โดยสีที่ปรากฏจะเข้มข้นเมื่อสภาวะในการทำปฏิกิริยารุนแรงมากขึ้น (อุณหภูมิ, ความเข้มข้นของกรดสูง และระยะเวลาในการให้ความร้อนนาน) ทำให้ค่าความขุ่นลดลง (Laurentin et al., 2003) ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Kwon และคณะปี 2005 ที่รายงานว่าสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากกรดได้ตัดพันธะไกลโคไซด์เป็นจำนวนมาก และมีการไหม้ (char) ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการ pyroconversion อีกด้วย

4.1.3 ความสามารถในการละลาย

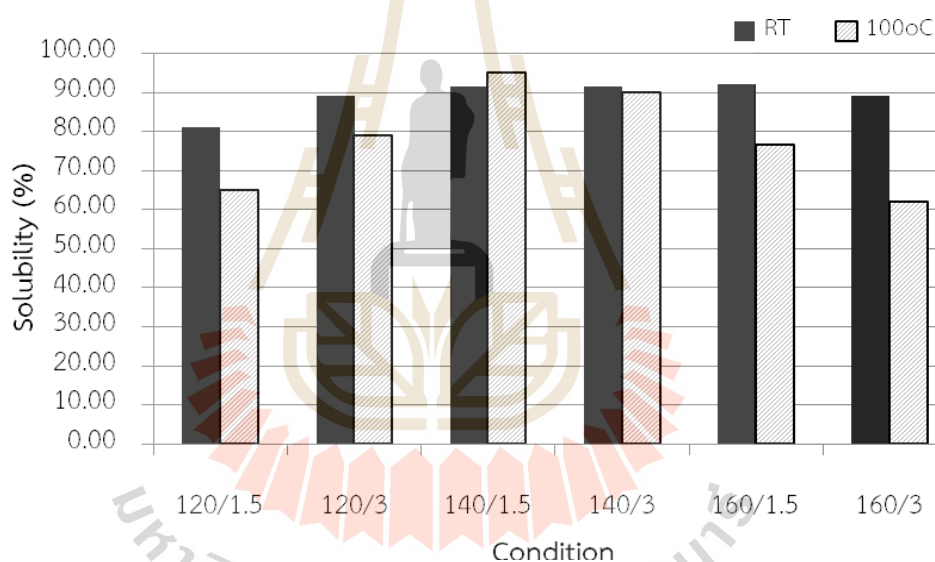
ภาพที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อละลายไพโรเดกซ์ตรินในสภาวะ control ที่อุณหภูมิน้ำเดือด พบว่าไพโรเดกซ์ตรินที่ผลิตโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำที่สุดประมาณ 81% และเพิ่มขึ้นมาที่ประมาณ 90% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อน ซึ่งอาจเป็นเพราะการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียวที่

ตารางที่ 4.2 ค่าความขาวของใยอาหารละลายน้ำ (ไฟโรเดกซ์ตริน) ที่เตรียมได้จากสภาวะต่างๆ ของการทำปฏิกิริยา Pyrodextrinization

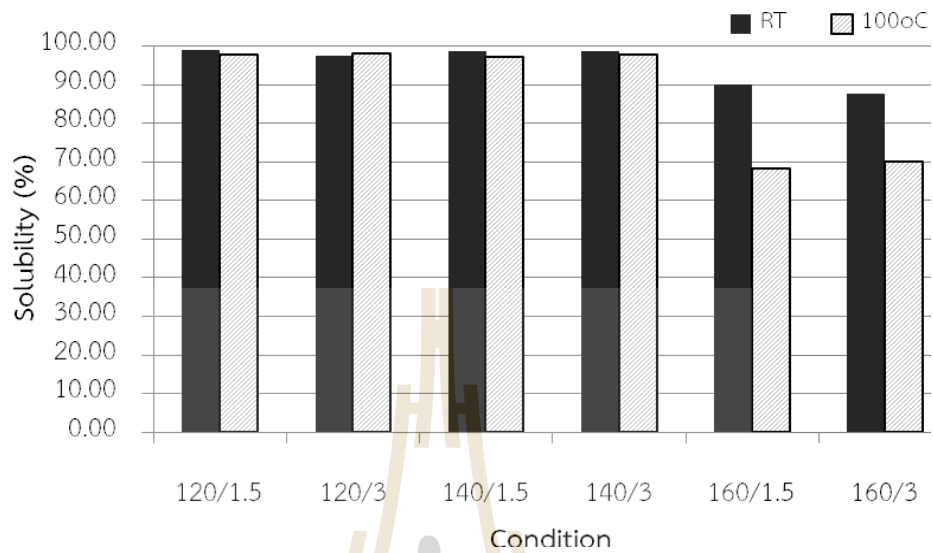
Condition	Temp. (°C)	[HCl] (M)	Time (h)	Color
				(Whiteness)
1	120	Control	1.5	92.86
2		2.2		77.12
3		3.2		74.95
4		Control	3.0	92.97
5		2.2		70.34
6		3.2		68.30
1	140	Control	1.5	92.56
2		2.2		74.54
3		3.2		73.43
4		Control	3.0	91.52
5		2.2		67.16
6		3.2		65.85
1	160	Control	1.5	91.31
2		2.2		70.51
3		3.2		70.28
4		Control	3.0	89.85
5		2.2		60.82
6		3.2		60.23
Native cassava starch				96.05

อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง ยังไม่เพียงพอที่จะทำให้พอลิเมอร์ภายในเม็ดแป้ง ถูกตัดเป็นสายสั้นๆ (depolymerization) ซึ่งจะทำให้ขนาดโมเลกุลของแป้งมีขนาดเล็กลง ส่วนไฟโรเดกซ์ตรินที่ละลายที่อุณหภูมิห้อง จะมีการละลายเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามไฟโรเดกซ์ตรินที่ผลิตได้ที่อุณหภูมิ 140-160 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะมีความสามารถในการละลายลดลง ซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากการกลับมาจับกันใหม่แบบสุ่มของ reducing end คือ α , β 1 \rightarrow 2, 1 \rightarrow 3 และ 1 \rightarrow 6 glucosidic linkage (repolymerization) จึงทำให้ความสามารถในการละลายลดลง แต่ถ้าให้ความร้อนช่วย ความสามารถในการละลายก็จะมีค่าสูงขึ้น เช่นเดิม ภาพที่ 4.2 และ 3.3 แสดงความสามารถในการละลายน้ำของไฟโรเดกซ์ตรินที่ใช้กรดรวมใน

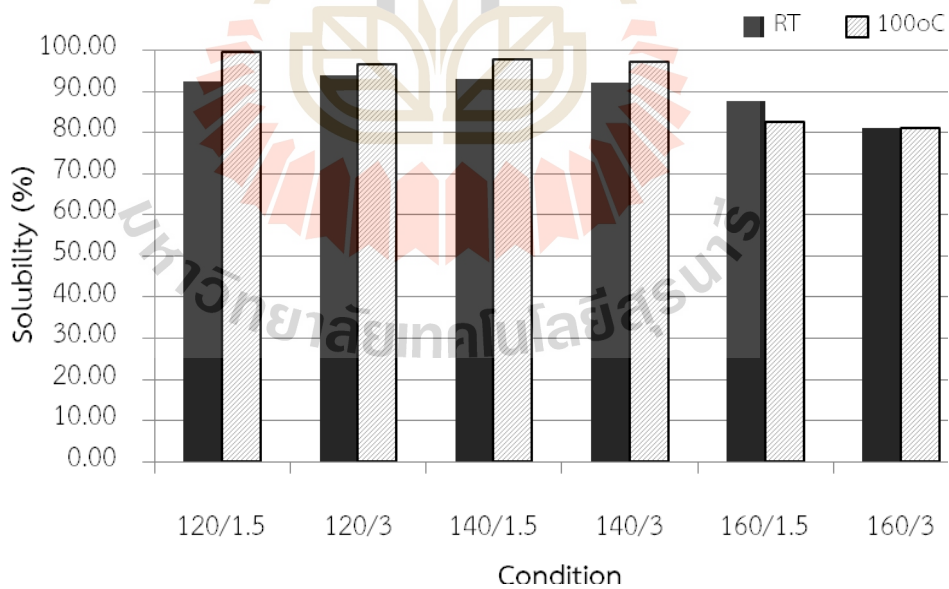
การทำปฏิกิริยา ซึ่งเมื่อใช้ความเข้มข้นของกรด 2.2 โมลาร์ในการทำปฏิกิริยา pyroconversion และนำไปละลายที่อุณหภูมิห้องและในอุณหภูมิน้ำเดือด พบว่าความสามารถในการละลายมีค่าสูงมากกว่า 95% แต่จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงที่ 160 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1.5 และ 3 ชั่วโมง (ภาพที่ 4.2) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดเป็น 3.2 โมลาร์ (ภาพที่ 4.3) ไพโรเดกซ์ตรินที่ผลิตได้จะมีความสามารถในการละลายสูงเช่นเดียวกับเมื่อใช้ความเข้มข้น 2.2 โมลาร์ แต่อย่างไรก็ตามไพโรเดกซ์ตรินที่ผลิตที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสรวมกับความเข้มข้นกรด 3.2 โมลาร์ จะมีความสามารถในการละลายน้ำดีกว่าเมื่อเทียบกับการใช้กรดความเข้มข้น 2.2 โมลาร์ เนื่องจากมีโมเลกุลที่มีขนาดเล็กมากกว่า



ภาพที่ 4.1 ความสามารถในการละลายของไพโรเดกซ์ตรินที่ผลิตในสภาวะต่างๆ โดยไม่ใช้กรดในการทำปฏิกิริยา (control) เมื่อ ■ คือ ไพโรเดกซ์ตรินที่ละลายที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และ □ คือ ไพโรเดกซ์ตรินที่ละลายที่อุณหภูมิห้อง



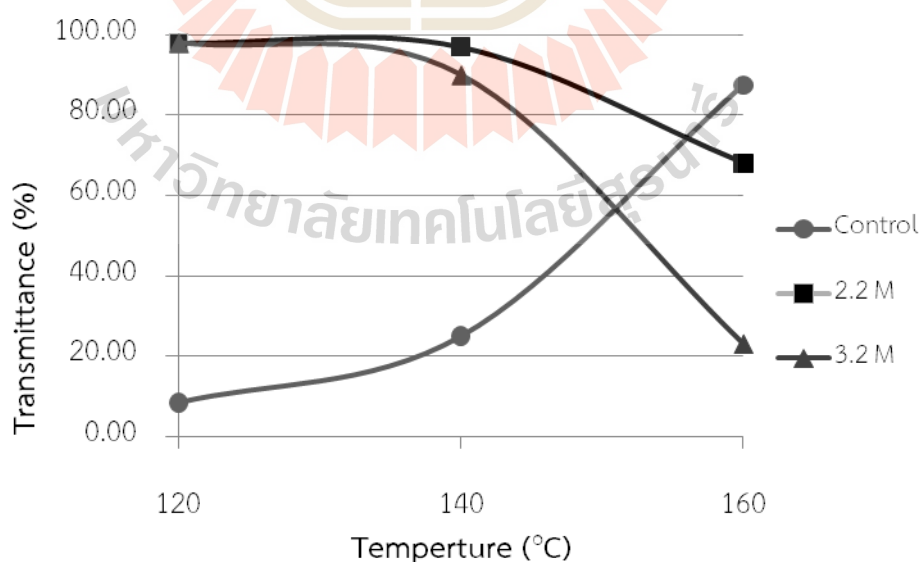
ภาพที่ 4.2 ความสามารถในการละลายของโพลีเดคซ์ตรินที่ผลิตในสภาวะต่างๆ โดยใช้กรด HCl 2.2 M ร่วมในการทำปฏิกิริยา เมื่อ ■ คือ โพลีเดคซ์ตรินที่ละลายที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และ □ คือ โพลีเดคซ์ตรินที่ละลายที่อุณหภูมิห้อง



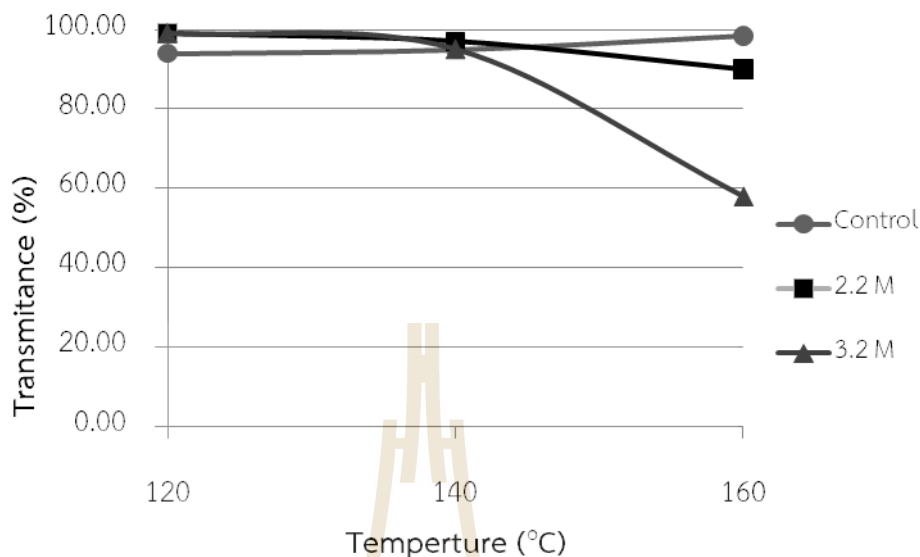
ภาพที่ 4.3 ความสามารถในการละลายของโพลีเดคซ์ตรินที่ผลิตในสภาวะต่างๆ โดยใช้กรด HCl 3.2 M ร่วมในการทำปฏิกิริยา เมื่อ ■ คือ โพลีเดคซ์ตรินที่ละลายที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และ □ คือ โพลีเดคซ์ตรินที่ละลายที่อุณหภูมิห้อง

4.1.4 ความขุ่น

ความขุ่นเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งของอุตสาหกรรมอาหารที่ต้องการความใส เช่น อุตสาหกรรมน้ำผลไม้และเครื่องดื่มต่างๆ เป็นต้น จากภาพที่ 4.4 แสดงความขุ่นของไฟโรเดกซ์ทรินที่ผลิตได้ที่สภาวะต่างๆ โดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120, 140, และ 160 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง เมื่อนำมาละลายที่อุณหภูมิห้องและวัดค่า % การส่องผ่าน (%Transmittance) พบว่าไฟโรเดกซ์ทรินที่ผลิตได้โดยไม่ใช้กรด (control) มีค่า % การส่องผ่านเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อยู่ในช่วง 10-85% ซึ่งอาจเป็นผลมาจากขนาดโมเลกุลที่เล็กลงทำให้มีการละลายที่ดีขึ้น และเป็นผลให้มีความขุ่นต่ำ ส่วนไฟโรเดกซ์ทรินที่ใช้กรด 2.2 และ 3.2 โมลาร์ ร่วมในการทำปฏิกิริยา พบว่ามี % การส่องผ่านที่สูงขึ้นมากกว่า 95% แสดงว่าสารละลายมีความขุ่นต่ำหรือมีความใสสูง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการผลิตไปที่ 160 องศาเซลเซียส พบว่า % การส่องผ่านมีค่าลดลงซึ่งสอดคล้องกับผลของการละลายเนื่องจากโมเลกุลภายในเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ และพวกที่เป็น nonstarch ที่เกิดจากการไหม้ ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการ pyroconversion ทำให้ความสามารถในการละลายและ % การส่องผ่านลดลง (Campechano-Carrera et al., 2007) จากภาพที่ 4.5 เมื่อละลายไฟโรเดกซ์ทรินในน้ำเดือด พบว่า % การส่องผ่านมีค่าสูงในทุกสภาวะการผลิตยกเว้นที่สภาวะอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และใช้กรดความเข้มข้น 3.2 โมลาร์ ซึ่งเป็นสภาวะการผลิตที่รุนแรง และแม้ว่าจะใช้น้ำที่อุณหภูมิสูงช่วยในการละลาย แต่ % การส่องผ่านกลับมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แสดงให้เห็นว่าการผลิตในสภาวะที่รุนแรงเช่นนี้ทำให้เกิดพวกที่เป็น nonstarch และพวกที่ถูกเผาไหม้สูง



ภาพที่ 4.4 ค่าความขุ่นของไฟโรเดกซ์ทรินที่เตรียมโดยให้ความร้อนเป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง เมื่อละลายที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 4.5 ค่าความขุ่นของไฟโรเดกซ์ตรินที่เตรียมโดยให้ความร้อนเป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง เมื่อละลายที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

4.1.5 ปริมาณ Available starch (AS)

ผลของสถานะในการทำปฏิกิริยา pyrodextrinization ต่อปริมาณ Available starch (AS) แสดงดังตารางที่ 4.3 โดยไฟโรเดกซ์ตรินที่ผลิตได้มีปริมาณ AS เกิดขึ้นในช่วง 30.46-95.16% ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิ ความเข้มข้นของกรด และความสัมพันธ์ของทั้งสองปัจจัยมีผลต่อปริมาณ AS อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) โดยปริมาณ AS จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น ซึ่งจากตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าแป้งมันสำปะหลังเริ่มต้นมีปริมาณ AS อยู่ที่ 95.16% แต่เมื่อทำปฏิกิริยา pyrodextrinization แล้ว ปริมาณ AS มีแนวโน้มลดลง โดยไฟโรเดกซ์ตรินที่ไม่ใช้กรดในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 และ 3 ชั่วโมง มีปริมาณ AS เกิดขึ้นที่ 84.26% และ 80.10% ตามลำดับ ซึ่งลดลงจากแป้งมันสำปะหลังเริ่มต้นไม่มากนัก แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อนไปที่ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 และ 3 ชั่วโมง ปริมาณ AS จะลดลงอย่างเห็นได้ชัดที่ 60.63% และ 59.44% ตามลำดับ ดังนั้นอุณหภูมิที่สูงขึ้นจึงส่งผลกระทบต่อลดลงของปริมาณ AS ส่วนไฟโรเดกซ์ตรินที่ใช้กรดที่ความเข้มข้น 2.2 และ 3.2 โมลาร์ร่วมกับความร้อนในการทำปฏิกิริยาพบว่าปริมาณ AS มีค่าลดลงจากแป้งมันสำปะหลังเริ่มต้น และไฟโรเดกซ์ตรินที่ให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยา ที่ความเข้มข้นของกรด 2.2 โมลาร์ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 และ 3 ชั่วโมง มีปริมาณ AS อยู่ที่ 52.12% และ 50.47% ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 และ 3 ชั่วโมง ปริมาณ AS มีค่าลดลงอยู่ที่ 36.26% และ 35.95% ตามลำดับ ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับไฟโรเดกซ์ตรินที่ผลิตโดยไม่ใช้กรด และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดเป็น 3.2 โมลาร์ พบว่าปริมาณ AS กลับยังมีค่าลดลง โดยที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 และ 3 ชั่วโมง มีปริมาณ AS อยู่ที่ 48.01%

และ 46.70% ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 และ 3 ชั่วโมง ปริมาณ AS จะยิ่งลดลงต่ำที่สุด คือ 31.33% และ 30.49% ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าทั้งอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดมีผลต่อการลดลงของปริมาณ AS โดยสาเหตุในการลดลงของปริมาณ AS ที่เกิดขึ้นนี้ น่าจะมาจากในระหว่างกระบวนการ pyroconversion แป้งจะถูกย่อยทำให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลง จากนั้นโมเลกุลที่ถูกตัดหรือถูกย่อยนี้จะกลับมาจับกันใหม่โดยหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่ใกล้กันจะจับกันและเกิดเป็นโครงสร้างกิ่งขึ้น ซึ่งเอนไซม์ในร่างกายจะไม่สามารถเข้าไปย่อยและเปลี่ยนเป็นพลังงานได้

ตารางที่ 4.3 ปริมาณ Available starch (AS, %)

Temp (°C)	No acid (control)		HCl (2.2 M)		HCl (3.2 M)	
	1.5 h	3.0 h	1.5 h	3.0 h	1.5 h	3.0 h
120	84.26 ^b	80.10 ^b	52.12 ^c	50.47 ^c	48.01 ^d	46.70 ^d
160	60.63 ^c	59.44 ^c	36.26 ^{de}	35.95 ^e	31.33 ^e	30.49 ^e
Native cassava starch = 95.16 ^a						

ตัวอักษรที่แตกต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.2 การลดขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังโดยการใช้กรดหรือเอนไซม์

4.2.1 การลดขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังด้วยกรด

ผลของการย่อยเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยกรดไฮโดรคลอริก (AS) ความเข้มข้น 2.2 M ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 – 6 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 4.6 โดยในช่วงแรกของการย่อยที่ 0 – 1 ชั่วโมง พบว่ากราฟมีความชันมาก แสดงให้เห็นว่าอัตราการย่อยเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นอัตราการย่อยยังคงเพิ่มขึ้นแต่ช้ากว่าในช่วงแรก ซึ่งกรดจะย่อยสตาร์ชในลักษณะไม่จำเพาะ คือ สามารถย่อยได้ทั้งพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง α -1,4 และ α -1,6 ผลการศึกษาที่มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Robin et al. (1975) ซึ่งได้ทำการทดลองย่อยสตาร์ชมันฝรั่งด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2.2 M ที่พบว่าอัตราการย่อยที่เกิดขึ้นแบ่งเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกของการย่อยจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากกรดจะเข้าไปย่อยบริเวณส่วนอสัณฐาน (amorphous) ของเม็ดสตาร์ช ซึ่งในส่วนนี้จะมีการจัดเรียงตัวของสายอะมิโลสแบบหลวมๆ ไม่เป็นระเบียบ การย่อยจึงเกิดขึ้นได้ง่ายและรวดเร็ว ส่วนการย่อยในช่วงที่สอง จะเกิดขึ้นที่บริเวณผลึก (crystalline) ของเม็ดสตาร์ช ซึ่งมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ การย่อยจึงเกิดขึ้นได้ช้ากว่าช่วงแรก นอกจากนี้รูปแบบของการย่อยที่เกิดขึ้นยังมีความสอดคล้องกับการย่อยสตาร์ชที่ได้จากธัญพืชและพืชตระกูลถั่วอีกด้วย (Hoover and Vasanthan, 1994; Inouchi, Glover and Fuwa, 1987; Jane, Wong and McPherson, 1997; Vasanthan and Bhatti, 1996) ซึ่งจากการศึกษาดังกล่าวด้วยการใช้ transmission electron microscopy (TEM) ซึ่งให้เห็นว่า การย่อยสตาร์ชด้วยกรดในช่วงแรกนั้นเกิดขึ้นที่บริเวณส่วนอสัณฐานเป็นหลัก และการย่อยจะเกิดขึ้นได้ช้าที่บริเวณผลึก ซึ่งอาจเกิดจากการ

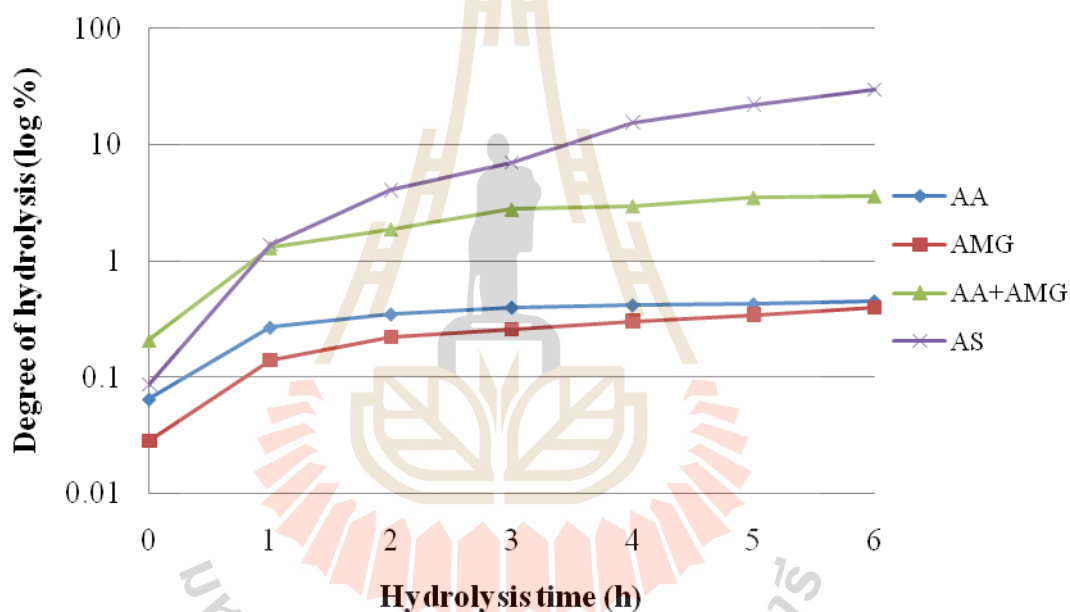
ที่ไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ไม่สามารถเจาะเข้าไปภายในส่วนผลึกที่มีการจัดเรียงตัวอย่างหนาแน่นได้ง่าย และอีกประการหนึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างแบบเก้าอี้ (chair) ไปเป็นแบบครึ่งเก้าอี้ (half chair) ซึ่งมีความจำเป็นสำหรับการย่อยสลายพันธะไกลโคซิดิก นั้นเกิดขึ้นได้ช้ามาก เนื่องจากโครงสร้างภายในส่วนผลึกของเม็ดสตาร์ชถูกตรึงไม่ให้เคลื่อนที่ (French, 1984; Kainuma and French, 1971)

4.2.2 การลดขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยวและแบบผสม

จากการศึกษาการลดขนาดอนุภาคของเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังโดยการย่อยด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยว คือ ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA, 120 ยูนิต/กรัมสตาร์ช) หรือ เอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG, 300 ยูนิต/กรัมสตาร์ช) เพียงอย่างเดียว และแบบผสม (AA+AMG) คือ ย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (120 ยูนิต/กรัมสตาร์ช) ร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (300 ยูนิต/กรัมสตาร์ช) เป็นเวลา 0 – 6 ชั่วโมง พบว่า ระดับการย่อยของเอนไซม์แต่ละกลุ่มซึ่งวัดจากปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในสารละลาย มีค่าที่แตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงดังภาพที่ 4.6 โดยการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียงอย่างเดียว มีระดับการย่อยน้อยที่สุด เนื่องจากเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสมีคุณสมบัติในการย่อยเป็นแบบ *exo-acting enzyme* คือเป็นเอนไซม์ที่ย่อยสตาร์ชพอลิเมอร์ได้ทั้งที่พันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง α -1,4 และ α -1,6 โดยจะย่อยจากส่วนปลายด้านนอนรีดิวส์ (non-reducing end) เข้ามาครั้งละ 1 หน่วย ได้เป็นน้ำตาลกลูโคส แต่การย่อยของเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส เป็นแบบ *endo-acting enzyme* คือจะตัดพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง α -1,4 เท่านั้น และตัดแบบสุ่ม ได้ผลิตภัณฑ์เป็นมอลโตส, มอลโตไตรโอส, โอลิโกแซ็กคารีไรด์ และลิมิตเดกซ์ทริน ดังนั้นปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่วัดได้จึงมีปริมาณสูงกว่าการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส

ผลการศึกษการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์แบบผสม พบว่ามีระดับการย่อยมากที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้เอนไซม์แบบเดี่ยวที่ใช้เวลาในการย่อยเท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากการใช้เอนไซม์ผสมนั้นมีการทำงานที่ส่งเสริมกันเมื่อนำมาใช้ร่วมกัน (Zhang et al., 2013) โดยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสจะย่อยพอลิเมอร์ของสตาร์ชให้เป็นเดกซ์ทริน จากนั้นเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสจะย่อยเดกซ์ทรินให้เป็นกลูโคสอีกครั้ง แม้ว่าเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียงอย่างเดียวนั้นก็สามารย่อยสตาร์ชพอลิเมอร์ให้กลายเป็นกลูโคสได้ แต่จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ปริมาณของน้ำตาลทั้งหมดที่ย่อยออกมาได้เมื่อใช้เอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียงชนิดเดียวนั้น มีปริมาณน้อยกว่าการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส เพียงอย่างเดียว และการย่อยด้วยเอนไซม์ผสม ซึ่งผลที่ได้นี้มีความสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Zhang et al. (2013) โดยศึกษการย่อยสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชมันฝรั่ง ด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียงอย่างเดียว และเอนไซม์ผสมระหว่างแอลฟาอะมิเลสและอะมิโลกลูโคซิเดส พบว่า สตาร์ชทั้งสองชนิดถูกย่อยด้วยเอนไซม์ผสมได้ดีกว่าการย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียงอย่างเดียว เนื่องมีการทำงานที่ส่งเสริมกันโดยทำหน้าที่ทั้ง *endo-acting enzyme* และ *exo-acting enzyme* ในเวลาเดียวกัน

เมื่อเปรียบเทียบผลของการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์ พบว่า การย่อยสตาร์ชโดยใช้เอนไซม์แบบผสมจะทำให้สตาร์ชถูกย่อยกลายเป็นน้ำตาลได้มากกว่าการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยว ดังนั้นสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แบบผสมจึงมีปริมาณผลผลิตเมื่อทำการล้างเพื่อกำจัดน้ำตาลออกไปหลังหยุดปฏิกิริยาของเอนไซม์ต่ำกว่าการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยว นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบการย่อยสตาร์ชโดยใช้กรดและเอนไซม์ พบว่าการย่อยสตาร์ชด้วยกรด ทำให้สตาร์ชถูกย่อยกลายเป็นน้ำตาลในปริมาณที่สูงกว่าการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์ ดังนั้น ผลผลิตของสตาร์ชตัดแปรด้วยกรดที่ได้หลังจากหยุดปฏิกิริยาและล้างเพื่อกำจัดน้ำตาลออกแล้ว จะมีปริมาณต่ำกว่าสตาร์ชที่ถูกตัดแปรด้วยเอนไซม์

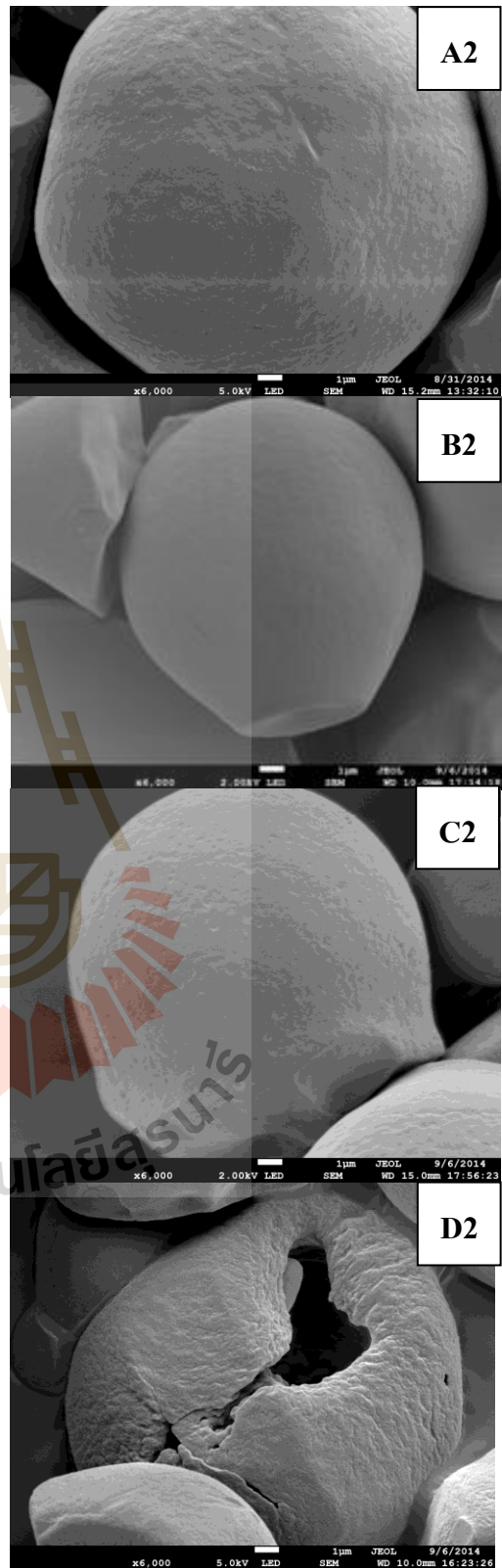
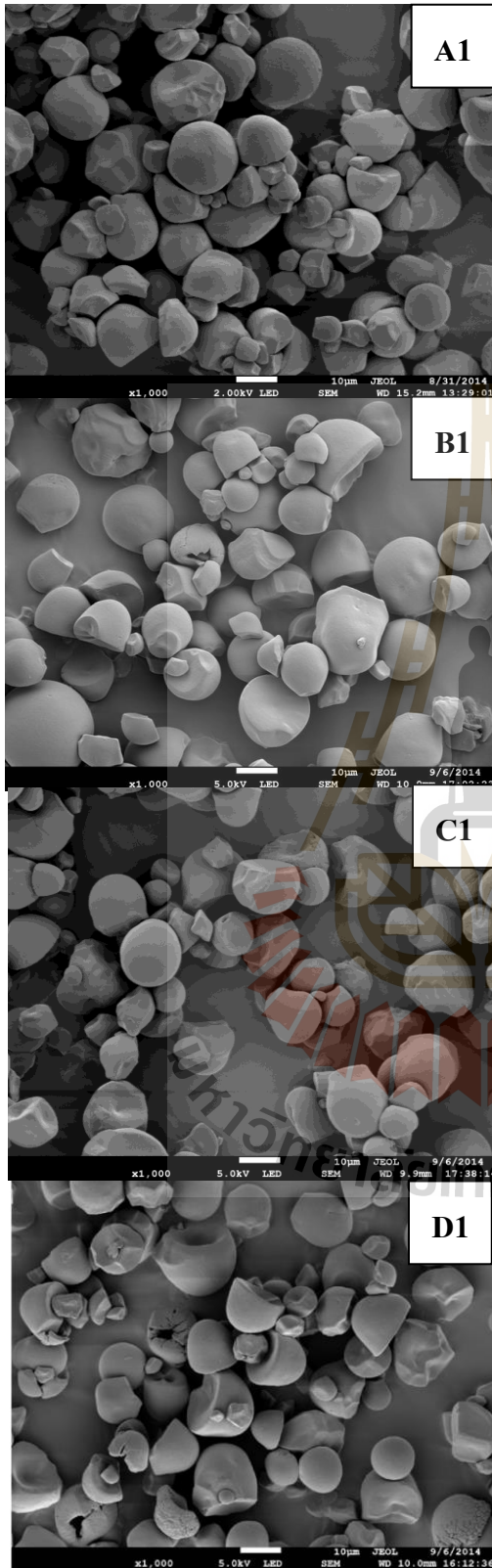


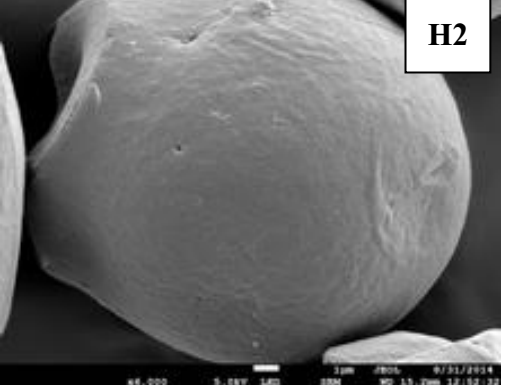
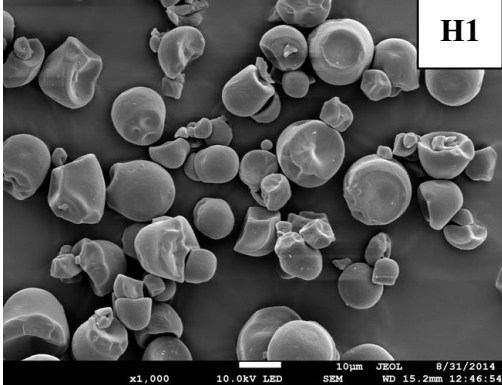
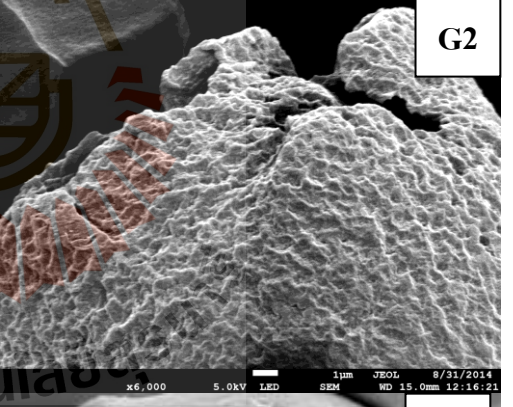
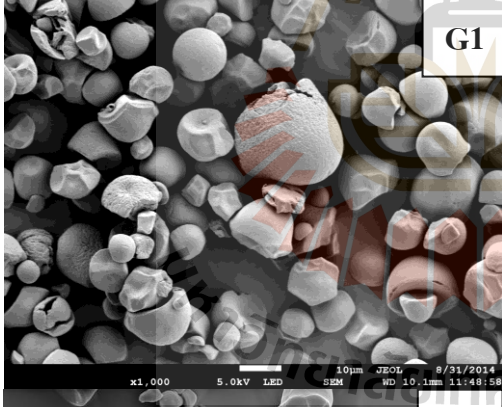
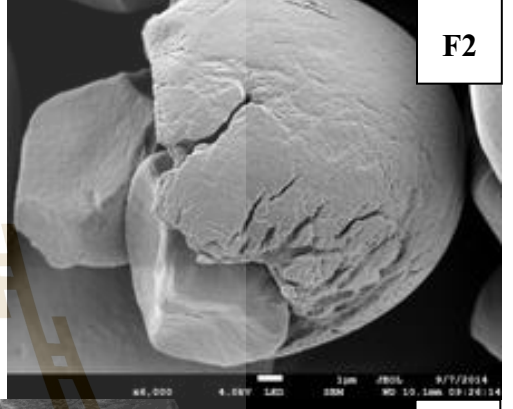
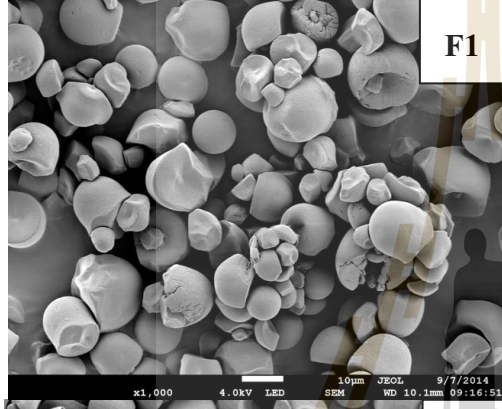
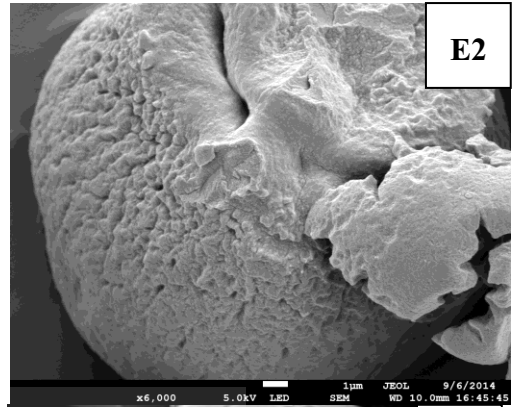
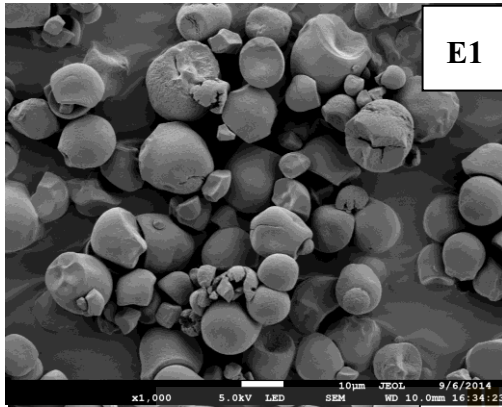
ภาพที่ 4.6 ปริมาณการย่อยของสตาร์ชด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยว คือ ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส เพียงอย่างเดียว (AA) และ ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส เพียงอย่างเดียว (AMG), แบบผสม คือ ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA+AMG) และย่อยด้วยกรด (AS)

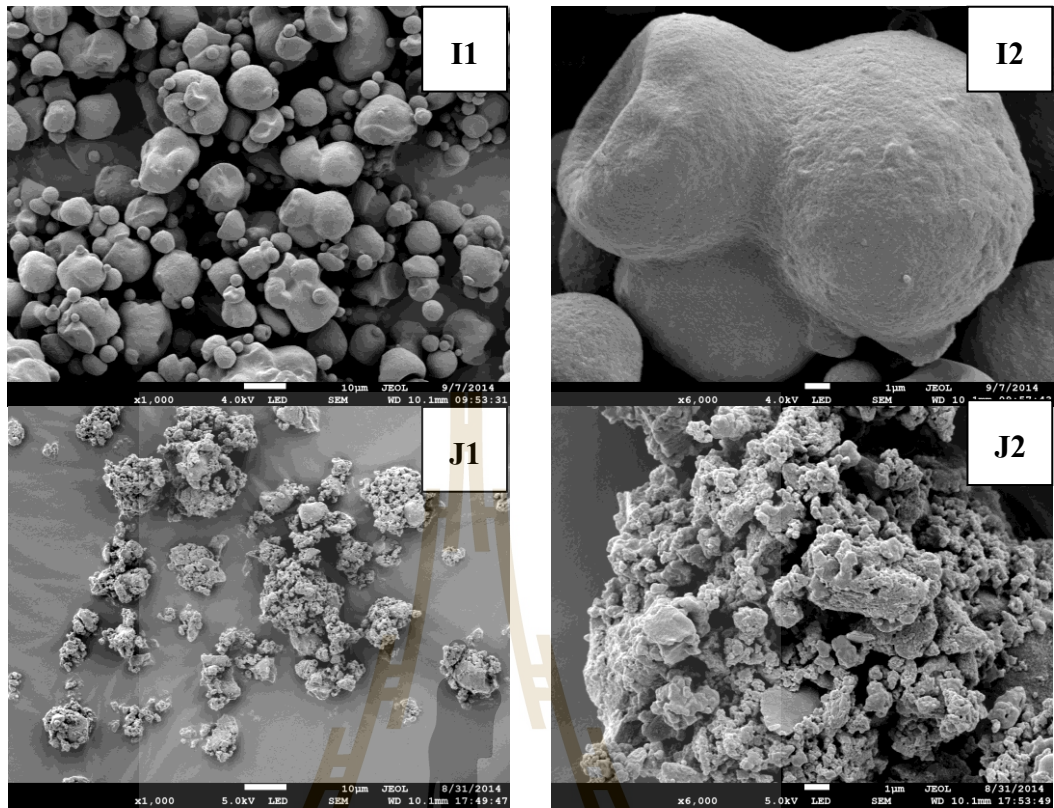
4.3 ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังตัดแปรด้วยวิธีการต่างๆ

ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชก่อนและหลังตัดแปรโดยการย่อยด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยว, แบบผสม, ย่อยด้วยกรด เป็นเวลา 1 และ 6 ชั่วโมง และใช้กรดย่อยเป็นเวลา 6 ชั่วโมงแล้วบดต่อด้วย ball mill เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Field Emission Scanning Electron Microscope, FE - SEM) แสดงดังภาพที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (ภาพที่ 4.7 A) มีรูปร่างเป็นทรงกลมปลายด้านหนึ่งถูกตัดลักษณะคล้ายปากแตร เรียกบริเวณนี้ว่า Turncatures ซึ่งบริเวณนี้ถือว่าเป็นจุดอ่อนของเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังที่นำไปสู่ความไวต่อปฏิกิริยาต่างๆ (Valetudie et al., 1993) ลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชก่อนการตัดแปรเมื่อตรวจสอบที่กำลังขยาย 30,000 เท่า (ภาพที่ 4.8A) พบว่าพื้นผิวมีทั้งส่วนที่เรียบและส่วนที่ขรุขระเล็กน้อย แต่ไม่พบลักษณะของรูพรุนขนาดใหญ่ที่ปรากฏบนพื้นผิวเหมือนกับสตาร์ชข้าวโพด ลูกเดือย และข้าวฟ่าง จากการศึกษานี้ของ Huber and BeMiller (2000) โดยการใช้ TEM ตรวจสอบเม็ดสตาร์ชจากข้าวโพด ลูกเดือย และข้าวฟ่างพบว่า สตาร์ชเหล่านี้มีช่องที่ต่อจากรูที่พื้นผิวภายนอกเข้าไปสู่ใจกลางของเม็ดแป้ง หรือ hilum แต่ความลึกของช่องจะแตกต่างกันไป ซึ่งเอนไซม์หรือกรดสามารถแพร่เข้าไปย่อยเม็ดสตาร์ชโดยผ่านช่องเหล่านี้ได้ง่ายและได้ดีกว่าสตาร์ชที่ไม่มีรูพรุนบนพื้นผิว (Rocha et al., 2010)

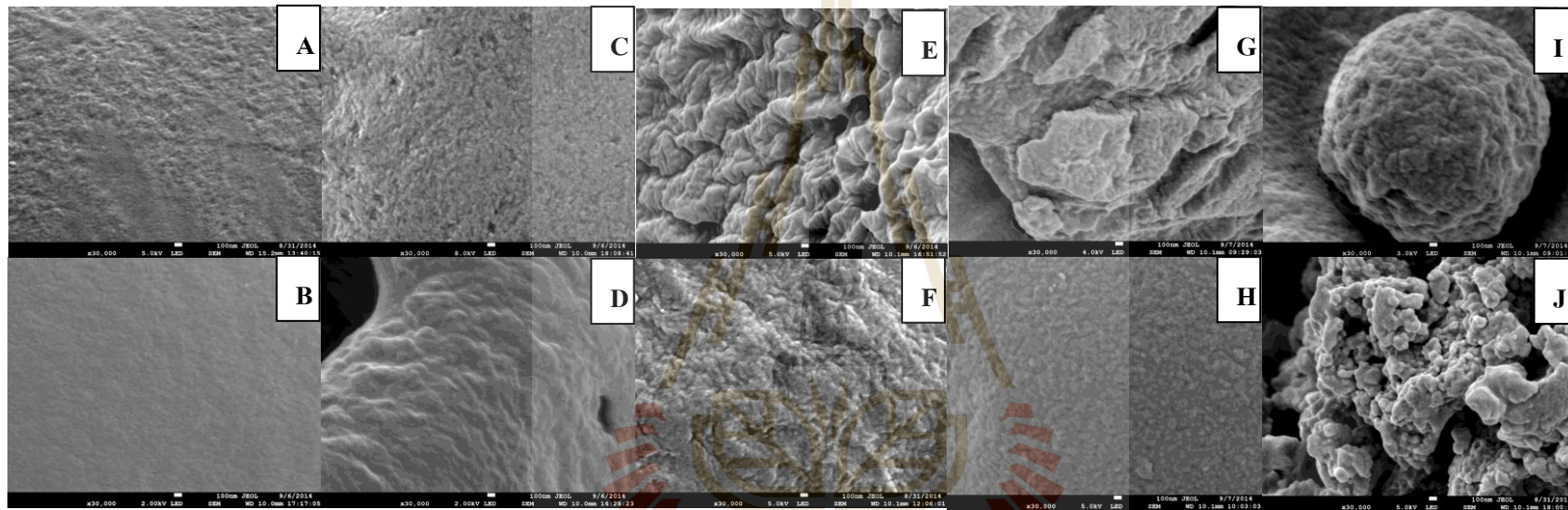
การย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์มีผลต่อพื้นผิวของสตาร์ชในรูปแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถจำแนกพื้นผิวที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ออกเป็น 5 รูปแบบได้ดังนี้ รูขนาดเล็ก (pin - holes), รูพรุนที่ถูกกัดเซาะลักษณะคล้ายฟองน้ำ (sponge - like erosion), รูขนาดกลาง (medium - size holes), รูที่รวมกันนำไปสู่รูเดี่ยวขนาดใหญ่ (single holes) และ พื้นผิวที่ถูกกัดกร่อน (surface erosion) (Sujka and Jamroz, 2006) โดยทั่วไปเอนไซม์สามารถกัดเซาะจากพื้นผิวภายนอกเข้าไปภายใน (exo - corrosion) และ สามารถเข้าไปย่อยภายในเม็ดสตาร์ชผ่านช่องหรือรูที่อยู่บนพื้นผิวออกมาสู่ภายนอกเม็ดสตาร์ช (endo - corrosion)







ภาพที่ 4.7 ลักษณะเม็ดสตาร์ชของตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการตัดแปรด้วยวิธีการต่างๆ ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 1,000 (1) และ 6,000 (2) เท่า: A) สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ, B) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง, C) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง, D) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง, E) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง, F) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง, G) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง, H) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง, I) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และ J) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมงแล้วบดด้วย ball mill



ภาพที่ 4.8 ลักษณะเม็ดสตาร์ชของตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการดัดแปรด้วยวิธีการต่างๆ ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ กำลังขยาย 30,000 เท่า: A) สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ, B) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง, C) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง, D) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง, E) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง, F) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง, G) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง, H) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง, I) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และ J) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมงแล้วบดด้วย ball mill

ภาพที่ 4.7 และ 4.8 B – G แสดงลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยวและแบบผสม ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 และ 6 ชั่วโมง ปรากฏลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกัน โดยสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียงอย่างเดียว จะมีพื้นผิวภายนอกของเม็ดสตาร์ชที่มีความขรุขระเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการย่อยสตาร์ชเพิ่มขึ้น เม็ดสตาร์ชบางส่วนแตกหัก โดยเฉพาะบริเวณ turncature ของเม็ดสตาร์ช เมื่อตรวจสอบพื้นผิวด้วยกำลังขยายสูง พบว่าบางส่วนนั้นเกิดรูพรุนขนาดใหญ่และพื้นผิวถูกกัดเซาะเป็นจำนวนมากเมื่อสตาร์ชถูกย่อยเป็นเวลา 6 ชั่วโมง (ภาพที่ 4.7 และ 4.8 D - E) ปรากฏการณ์นี้ Huber and BeMiller (2000) ได้อธิบายไว้ว่า เอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสสามารถทำให้เกิดช่องเปิดที่นำไปสู่ภายในเม็ดสตาร์ชได้ นอกจากนี้ยังสามารถขยายรูบริเวณพื้นผิวโดยเอนไซม์จะแพร่ผ่านเข้าไปทางรูที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวแล้วย่อยจากจุดศูนย์กลางของเม็ดสตาร์ช (hilum) ออกมาสู่พื้นผิวภายนอกได้ (endo – corrosion) จึงทำให้เห็นว่ สตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสนั้นปรากฏรูขนาดใหญ่และมีพื้นที่ผิวขรุขระมาก รูพรุนที่ถูกกัดเซาะลักษณะคล้ายกับฟองน้ำ (sponge – like erosion) ส่วนสตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเพียงอย่างเดียว ปรากฏลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างออกไป โดยลักษณะและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชหลังถูกย่อยนั้นไม่ได้แตกต่างไปจากสตาร์ชดิบ เมื่อทำการย่อยสตาร์ชเป็นเวลา 1 และ 6 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 4.7 B - C แต่เมื่อตรวจสอบพื้นผิวที่กำลังขยายสูงของสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่า มีรูพรุนเล็กๆ จำนวนมากเกิดขึ้นที่พื้นผิว (pin – holes) และมีความขรุขระเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสตาร์ชดิบ (ภาพที่ 4.8 A และ C) แต่ความรุนแรงของการถูกกัดเซาะที่เกิดขึ้นนั้นน้อยกว่าสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส เนื่องจากการกัดกร่อนของเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเกิดขึ้นที่บริเวณผิวนอก (surface erosion) เท่านั้น ไม่มีการเจาะเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ชแล้วย่อยออกมาสู่ด้านนอกพื้นผิว

ผลการศึกษการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์ผสมเป็นเวลา 1 และ 6 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 4.7 F – G พบว่า สตาร์ชมีพื้นผิวที่ขรุขระเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการย่อยเพิ่มขึ้น การย่อยสตาร์ชเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ส่งผลให้สตาร์ชบางเม็ดเกิดรอยแตกขนาดใหญ่บนผิวนอกของเม็ดสตาร์ช (ภาพที่ 4.8 G) และบางเม็ดเกิดเป็นรูเดี่ยวขนาดใหญ่ ภายในมีความขรุขระ และรูที่เกิดขึ้นขยายลงไปสู่ส่วนกลางของเม็ดสตาร์ชอีกด้วย แสดงดังภาคผนวก (ภาพที่ ผน1) ดังนั้นการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์ผสมสามารถอธิบายได้ว่า การย่อยเกิดขึ้นทั้งบริเวณภายนอกพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชและยังย่อยเข้าไปในส่วนกลางของเม็ดสตาร์ชอีกด้วย โดยการศึกษาก่อนหน้านี้ได้อธิบายการกัดเซาะเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังโดยใช้เอนไซม์ผสมไว้ว่า การกัดเซาะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวนอกของเม็ดสตาร์ช (Uthumporna et. al., 2010) โดยเริ่มต้นเม็ดสตาร์ชจะถูกย่อยที่บริเวณผิวนอกก่อนด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส ทำให้พื้นผิวมีความขรุขระ บางเม็ดอาจมีขนาดเล็กลง จากนั้นพื้นที่ที่ขรุขระนี้ เอนไซม์จะกัดเซาะต่อไปจนเกิดเป็นรูพรุนทำให้เอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสแพร่ผ่านเข้าไปย่อยเม็ดสตาร์ชจากภายในแล้วกลายเป็นรูเดี่ยวที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

สตาร์ชมันสำปะหลังที่ถูกย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 และ 6 ชั่วโมงนั้น เมื่อตรวจสอบด้วย SEM พบว่า รูปร่าง และขนาดของเม็ดสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ไม่มีความแตกต่างไปจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ แต่เมื่อตรวจสอบที่กำลังขยายสูง พบว่า สตาร์ชมีลักษณะพื้นผิวที่มีความขรุขระเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ภาพที่ 4.8 H) แต่สตาร์ชที่ย่อยด้วย

กรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่า รูปร่าง ขนาด และลักษณะของพื้นผิวที่เกิดขึ้นแตกต่างจากสตาโรลัมสำหรับลำปะหลังดิบ และสตาโรลัมที่ย่อยด้วยเอนไซม์ (ภาพที่ 4.7 และ 4.8 I) จากภาพพบว่า มีเม็ดสตาโรลัมขนาดเล็กเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก และยังมีเม็ดสตาโรลัมที่หลอมรวมติดกันกลายเป็นเม็ดสตาโรลัมขนาดใหญ่ด้วยเช่นกัน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “melted” (Calorina and Franco, 2010) พื้นผิวภายนอกไม่ปรากฏรูพรุนขนาดกลางหรือขนาดใหญ่เกิดขึ้น แต่เมื่อตรวจสอบพื้นผิวที่กำลังขยายสูง (ภาพที่ 4.8 I) พบว่า พื้นผิวมีความขรุขระตลอดทั้งพื้นผิว ลักษณะเหมือนผิวของลูกมะกรูด และไม่ปรากฏรูที่เจาะเข้าไปภายในแกนกลางของเม็ดสตาโรลัม ลักษณะเป็นเพียงการกัดกร่อนจากภายนอกเท่านั้น ซึ่งผลที่เกิดขึ้นนี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Sanguanpong et al. (2003) ที่ทำการศึกษการย่อยสตาโรลัมสำหรับลำปะหลังด้วยการใช้กรดไฮโดรคลอริก โดยจากการศึกษาพบว่ากรดได้กัดกร่อนเม็ดสตาโรลัมที่บริเวณพื้นผิวภายนอก เมื่อการย่อยเพิ่มขึ้นก็ปรากฏรูเล็กๆ บนพื้นผิวของเม็ดสตาโรลัม และการย่อยที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้เม็ดสตาโรลัมมีขนาดเล็กลง และมีรูปร่างที่ผิดปกติไป นอกจากนี้จากการศึกษาของ Atichokudomchai et al. (2000) ซึ่งทำการย่อยสตาโรลัมสำหรับลำปะหลังด้วยกรดไฮโดรคลอริก และติดตามการเปลี่ยนแปลงของเม็ดสตาโรลัมเมื่อเวลาในการย่อยสตาโรลัมเพิ่มขึ้น ก็พบว่า กรดได้เข้าไปย่อยพื้นผิวของเม็ดสตาโรลัมให้หลุดออกทีละชั้น โดยตอนเริ่มต้นของการย่อย เม็ดสตาโรลัมมีพื้นผิวค่อนข้างเรียบและเริ่มขรุขระขึ้น จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปผิวชั้นนอกเริ่มหลุดออกเผยให้เห็นผิวชั้นถัดมา ซึ่งเป็นผิวที่ค่อนข้างเรียบและถูกย่อยให้หลุดออกเป็นชั้นต่อไป ซึ่งลักษณะเช่นนี้อาจเป็นสาเหตุให้เม็ดสตาโรลัมมีขนาดเล็กลงแต่ไม่เกิดเป็นรูขนาดใหญ่ เนื่องจากกลไกที่เกิดขึ้นเป็นการกัดกร่อนที่พื้นผิวภายนอกให้หลุดออกไปทีละชั้นเท่านั้น ส่วนเม็ดสตาโรลัมที่เกิดการหลอมรวมตัวกันกลายเป็นเม็ดขนาดใหญ่ นั้น เกิดจากการที่ผิวของสตาโรลัมที่ถูกย่อยออกไป เกิดการหลอม (melting) ทำให้เกิดของเหลวลักษณะคล้ายกาวหรือซีเมนต์ไปยึดเม็ดสตาโรลัมที่อยู่ใกล้กันเข้ามาติดกันกลายเป็นเม็ดสตาโรลัมที่มีรูปร่างใหม่เกิดขึ้น (Calorina and Franco, 2010)

การตัดแปรเม็ดสตาโรลัมโดยการย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำมาบดต่อด้วย ball mill เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (ASBM) เมื่อตรวจสอบด้วย SEM พบว่า เม็ดสตาโรลัมมีการเปลี่ยนแปลงทางรูปร่างเป็นอย่างมาก โดยเม็ดสตาโรลัมจะแตกออกเป็นอนุภาคขนาดเล็ก (small - particle) มีพื้นผิวที่ขรุขระ และสูญเสียลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาโรลัมไป บางส่วนมีลักษณะถูกทำให้แตกออกเป็นแผ่น และบางส่วนที่แตกออกเป็นอนุภาคขนาดเล็กนั้น กลับเข้ามารวมตัวกันกลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แสดงดังภาพที่ 4.7 J1 และ J2 เมื่อตรวจสอบที่กำลังขยายสูง (ภาพที่ 4.8 J) พบว่าพื้นผิวที่ขรุขระนั้น มีลักษณะค่อนข้างมนไม่มีเหลี่ยมมุม จากภาพได้แสดงให้เห็นว่า แรงทางกล (แรงคอมเพรสชัน, แรงอิมแพค และ แรงแอทริชันหรือแรงเฉือน) ได้ทำลายลักษณะรูปร่างความเป็นเม็ดสตาโรลัมให้เกิดการแตกหักเป็นอนุภาคขนาดต่างๆ ซึ่งกลไกการแตกนี้สามารถจำแนกได้ตามวิธีของ : Popplewell and Peleg (1989) ออกเป็น 2 ชนิด คือ shattering ซึ่งเป็นกลไกที่ทำให้อนุภาคเล็กลง 2 – 5 เท่าของอนุภาคเริ่มต้น และ erosion หรือ abrasion เป็นกลไกที่ทำให้อนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดเล็กลงมากกว่า 10 เท่า ของขนาดอนุภาคเริ่มต้น (ลักษณะกลไกการแตกดังแสดงใน ภาพที่ 2.7) จากผลการทดลองนั้นแสดงให้เห็นว่าการแตกอาจเกิดขึ้นจากทั้ง 2 แบบ แต่ลักษณะของ erosion หรือ abrasion ที่ทำให้เกิดอนุภาคขนาดเล็กละเอียดนั้นอาจเกิดขึ้นมากกว่า การแตกแบบ shattering ซึ่งสังเกตจากส่วนที่แตกออกเป็นชิ้นใหญ่ๆ มีปริมาณน้อยกว่า การย่อยสตาโรลัมด้วยกรดก่อนนำไปบดด้วย

ball mill มีส่วนช่วยให้เกิดอนุภาคขนาดเล็กละเอียดได้ง่ายกว่าการนำสตาร์ชดิบ ไปทำการบดด้วย ball mill โดยตรง ซึ่งจากการศึกษาของ Jane et al. (1992) และ Sanguanpong et al. (2002) ได้รายงานว่าการย่อยสตาร์ชด้วยกรดก่อนนั้นเป็นการกำจัดส่วนอสัณฐานซึ่งเป็นส่วนที่มีความยืดหยุ่นของสตาร์ชออกไป โครงสร้างภายในจึงเปราะ ทำให้การแตกหักเกิดขึ้นได้ง่ายและมีประสิทธิภาพสูง นอกจากนี้การบดด้วย ball mill เป็นเวลานานยังก่อให้เกิดความร้อน ซึ่งมีส่วนทำให้สตาร์ชเกิดการเจลาติไนซ์ (gelatinization) ได้บางส่วน (Tamaki et al., 1997) ดังนั้นเมื่อสังเกตจากภาพ SEM ที่กำลังขยายสูง (ภาพที่ 4.8 J) จึงเห็นพื้นผิวที่ขรุขระนั้นมีความมันไม่มีเหลี่ยมมุม และเศษชิ้นส่วนที่แตกเป็นอนุภาคขนาดเล็กกลับมาหลวมรวมติดกัน กลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

จากผลการตรวจสอบด้วย SEM ข้างต้น พบว่าสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยว, แบบผสม และย่อยด้วยกรด เป็นเวลา 6 ชั่วโมง มีลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบอย่างชัดเจน ดังนั้น ในการศึกษาจึงเลือกสตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์และกรด เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ไปทำการศึกษาคูณสมบัติอื่นๆ ในขั้นต่อไป

4.4 ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการตัดแปร

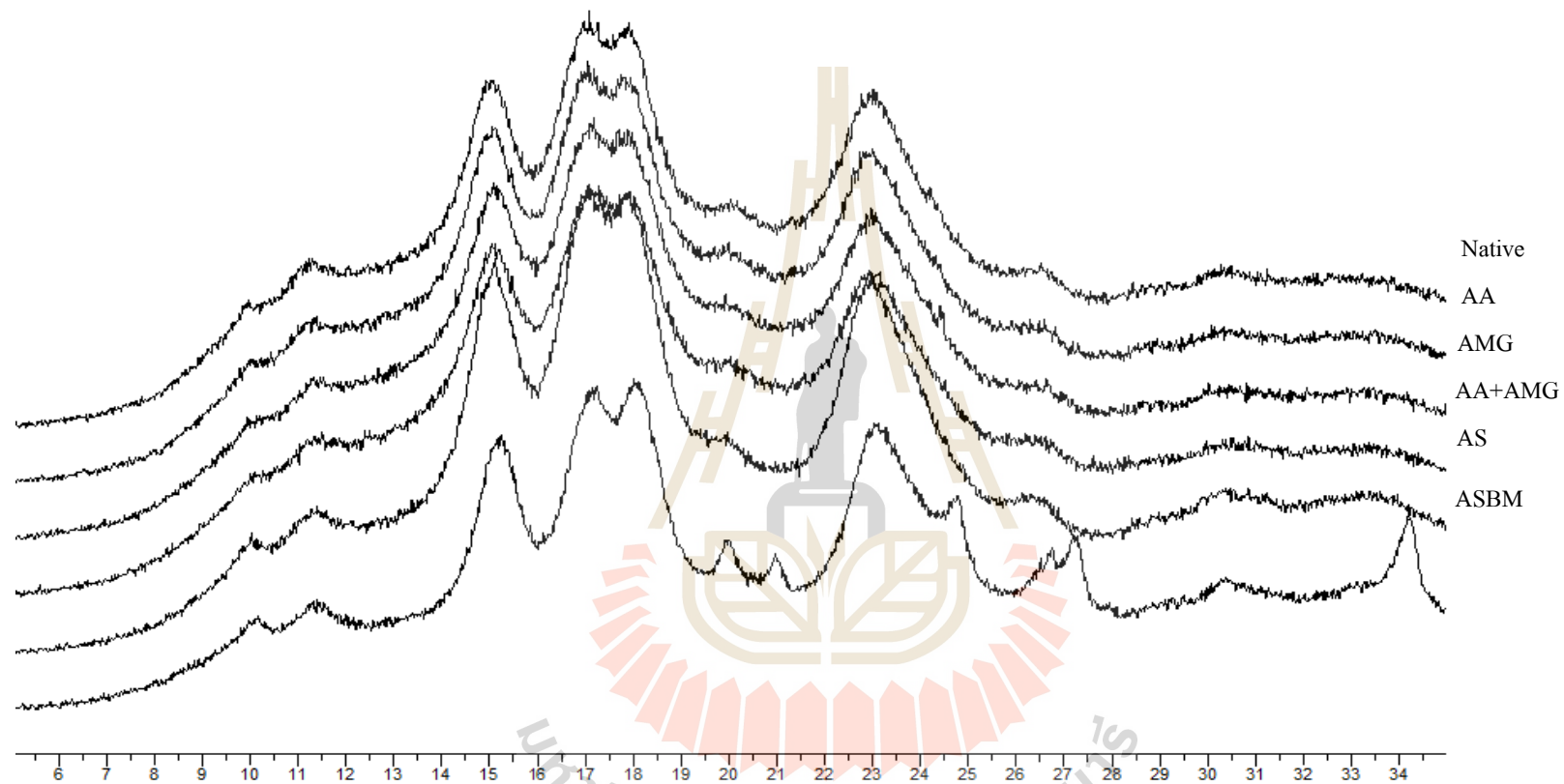
X - ray diffraction (XRD) pattern ของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยว, แบบผสม, และย่อยด้วยกรด เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 4.9 ทุกตัวอย่างสตาร์ชมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ A ซึ่งจะปรากฏพิกเดียว (Single peak) ที่ชัดเจนที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 15° และ 23° และปรากฏพิกคู่ (Double peak) ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 10° , 11° และ 17° , 18° โดยโครงสร้างผลึกแบบ A นี้ สามารถพบได้ทั่วไปในสตาร์ชจากธัญพืช ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ที่ระบุว่าสตาร์ชมันสำปะหลังซึ่งเป็นพืชตระกูลหัวหรือรากนี้มีโครงสร้างผลึกแบบ A (Atichokudomchai et al., 2001; Sanguanpong et al., 2002; Calorina et al., 2010) นอกจากนี้จากภาพที่ 4.9 ยังพบอีกว่าสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball mill (ASBM) นั้นมีลักษณะทางโครงสร้างผลึกที่แตกต่างออกไป คือ ปรากฏพิกเดี่ยวที่ 2θ ที่ 20° ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ V สตาร์ช (Amparo et al., 2008) โดยทั่วไปแล้วสตาร์ชจะแสดงลักษณะโครงสร้างของผลึกเป็นแบบ A, B และ C นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างของผลึกแบบ V ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของสายอะมิโลสกับสารประกอบเชิงซ้อน เช่น ไอโอดีน, DMSO, แอลกอฮอล์ และ กรดไขมันอีกด้วย (Buléon et al., 1998) จากการที่ตัวอย่าง ASBM แสดงลักษณะโครงสร้างทางผลึกแบบ V นั้น อาจเกิดเนื่องจากขั้นตอนของการบดด้วย ball mill ได้มีการเตรียมตัวอย่างโดยการย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และได้มีการใช้แอลกอฮอล์ 99% เป็นตัวช่วยในการกระจายตัวอย่างในระหว่างการบด ดังนั้นอะมิโลสในตัวอย่างสตาร์ชจึงอาจเกิดการรวมตัวกับแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการกระจายตัวอย่าง จึงทำให้เกิดโครงสร้างผลึกแบบ V ขึ้น

การตรวจสอบปริมาณผลึก (relative crystallinity) ของสตาร์ชทั้งก่อนและหลังการตัดแปร แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่า วิธีการตัดแปรสตาร์ชที่ต่างกันมีผลต่อการเพิ่มขึ้นและลดลงของปริมาณผลึกที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยตัวอย่างที่ถูกย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง นั้นมีปริมาณผลึกสูงที่สุด ซึ่งอาจเกิดจากการเข้าไปทำลายบริเวณอสัณฐานของสตาร์ช จึงส่งผลให้มีปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น โดยสังเกตได้จากความเข้มของ XRD pattern ที่เพิ่มสูงขึ้น (Wang

and Wang, 2001) และเมื่อนำตัวอย่างที่ย่อยด้วยกรดไปบดต่อด้วย ball mill เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าผลึกมีปริมาณลดลง แต่ยังคงสูงกว่าตัวอย่างที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ ซึ่งอาจเป็นเพราะแรงทางกลที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้ ball mill เป็นตัวเหนี่ยวนำทำให้เกิดพลังงานความร้อน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ปริมาณผลึกลดลงไป (Sanguanpong et al., 2002) นอกจากนี้จุดเดือดของแอลกอฮอล์มีค่าต่ำกว่าน้ำ การเกิดเจลลาติโนเซชันของสตาร์ชจึงเกิดได้ง่าย และอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ปริมาณผลึกลดลง

เมื่อพิจารณาผลการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยวและแบบผสมต่อปริมาณผลึก พบว่าสตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเพียงอย่างเดียวและเอนไซม์ผสม มีปริมาณผลึกลดลงเมื่อเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ โดยตัวอย่างสตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์ผสมมีปริมาณผลึกลดลงมากที่สุด รองลงมา คือ ตัวอย่างสตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเพียงอย่างเดียว ส่วนตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียงอย่างเดียว มีปริมาณผลึกไม่แตกต่างจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ เนื่องจากเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสอาจย่อยสตาร์ชพอลิเมอร์ในบริเวณส่วนอสัณฐานและส่วนของผลึกในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน สำหรับตัวอย่างสตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเพียงอย่างเดียวมีปริมาณผลึกลดลง เนื่องจากเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสมีกลไกการย่อยสตาร์ชพอลิเมอร์แบบสุม การตัดสายพอลิเมอร์ของสตาร์ชจะตัดได้ยาวกว่าการย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส ที่จะตัดพอลิเมอร์ของสตาร์ชทีละหน่วยเพื่อให้ได้กลูโคส ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่าเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสจะสุมตัดพอลิเมอร์ของสตาร์ชเข้ามาจนถึงบริเวณส่วนของผลึกได้

การลดลงมากที่สุดของปริมาณผลึกในตัวอย่างสตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์ผสมนั้น อาจเป็นผลมาจากการทำงานแบบเสริมประสิทธิภาพซึ่งกันและกันของทั้งสองเอนไซม์ที่มีการทำงาน แบบ endo- และ exo-enzyme ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว นอกจากนี้การแพร่และการดูดซับเอนไซม์ยังมีอิทธิพลต่อการเริ่มต้นการย่อยเม็ดสตาร์ชอีกด้วย (Helbert et al., 1996) การแพร่ของเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสไปบนพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชนั้น เป็นขั้นตอนที่สำคัญสำหรับกระบวนการย่อยเป็นอย่างมาก เมื่อเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสแพร่ไปยังพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชแล้ว บริเวณพื้นผิวภายนอกจะเกิดเป็นรูพรุนขนาดเล็กขึ้นมาเรื่อยๆ (ภาพที่ 4.8 C) หลังจากนั้นเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสจะแพร่ผ่านรูพรุนดังกล่าวเข้าไปย่อยภายในเม็ดสตาร์ชได้ง่ายขึ้น ทำให้ปริมาณผลึกของสตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์ผสมมีปริมาณผลึกลดลงมากกว่ากระบวนการย่อยแบบอื่น



ภาพที่ 4.9 ลักษณะโครงสร้างผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA+AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS), และ สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball mill (ASBM)

ตารางที่ 4.4 ปริมาณผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA+AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS), และ สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดและบดด้วย ball mill (ASBM)

Sample	Relative crystallinity (%)	Crystalline pattern
Native	24.58 ± 0.17 ^c	A
AA	22.23 ± 1.25 ^d	A
AMG	25.34 ± 0.23 ^c	A
AA+AMG	21.88 ± 0.45 ^e	A
AS	34.88 ± 0.46 ^a	A
ASBM	31.05 ± 0.80 ^b	A + V

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.5 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA+AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS), และ สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบด ด้วย ball mill (ASBM)

ตัวอย่าง	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (μm)
Native	14.71 ± 0.04 ^b
AA	14.73 ± 0.09 ^b
AMG	14.70 ± 0.20 ^b
AA+AMG	14.72 ± 0.21 ^b
AS	15.93 ± 0.42 ^c
ASBM	9.96 ± 0.04 ^a

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.5 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการตัดแปร

ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเฉลี่ยสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยว, แบบผสม, ย่อยด้วยกรด เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด 6 ชั่วโมง และบดต่อด้วย ball mill เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 4.5 โดยตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 14.71 ไมครอน หลังจากการตัดแปรสตาร์ชด้วยเอนไซม์ทั้งแบบเดี่ยวและแบบผสม พบว่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีค่าไม่แตกต่างไปจากสตาร์ชดิบ ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นได้ว่าการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ไม่ได้ทำให้ขนาดของเม็ดสตาร์ชเปลี่ยนแปลงไป เพียงแต่ทำให้พื้นผิวที่เกิดขึ้นนั้นเปลี่ยนแปลงไปเท่านั้น (ดังแสดงในภาพถ่าย SEM) แต่อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่ถูกย่อยด้วยกรดและตัวอย่างที่ย่อยด้วยกรดแล้ว

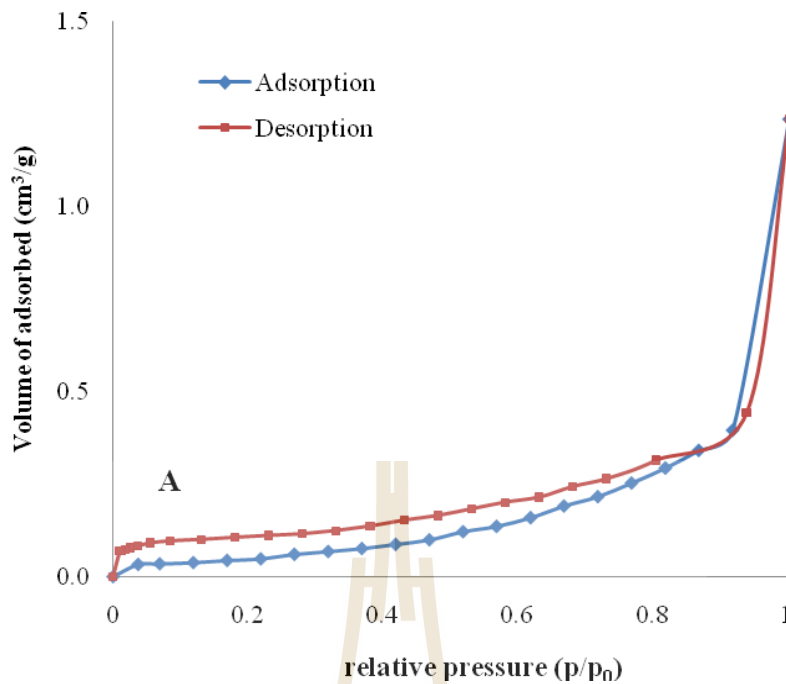
บดด้วย ball mill จะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไป โดยตัวอย่างที่ย่อยด้วยกรด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 15.93 ไมครอน เมื่อเทียบกับตัวอย่างสตาโรซดิบ ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจาก ในระหว่างการย่อยสตาโรซ กรดจะเข้าไปทำลายที่บริเวณพื้นผิวของสตาโรซ จากนั้นส่วนที่ถูกย่อยออกไปจะเกิดการหลอม (melting) ทำให้เกิดของเหลวลักษณะคล้ายกาวไปยึดเม็ดสตาโรซที่อยู่ใกล้เข้ามาติดกัน ทำให้ขนาดอนุภาคของสตาโรซที่ตัดแปรด้วยวิธีนี้บางส่วนมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนตัวอย่างที่ย่อยด้วยกรดและบดด้วย ball mill มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยลดลงมาก (9.96 ไมครอน) เมื่อเทียบกับสตาโรซดิบ ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ ball mill เป็นการทำให้วัตถุถูกระแทก (Catacting/ Impact grinding force) และ/หรือเกิดการขัดสี (Abrasion/ Attrition grinding force) ด้วยลูกบอลเซรามิกจนเกิดการแตกและสลายตัวเล็กลงจนได้ขนาดตามที่ต้องการ (วีระยุทธ์, 2546)

4.6 ผลของขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน ของสตาโรซตัดแปร

4.6.1 ลักษณะการดูดซับ และการคายซับของแก๊สไนโตรเจนบนพื้นผิวของสตาโรซ

ผลการศึกษาขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่ความดันต่ำ พบว่าไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับ (adsorption and desorption isotherm) ของสตาโรซมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 4.5 ซึ่งเมื่อจำแนกไอโซเทอมของการดูดซับตามระบบ IUPAC (Sing, 1985) พบว่าไอโซเทอมที่เกิดขึ้นแสดงลักษณะของไอโซเทอมชนิดที่ 2 (Type II) นอกจากนี้สตาโรซหลังการตัดแปรด้วยวิธีการต่างๆ ได้แสดงไอโซเทอมเป็นแบบชนิดที่ 2 เช่นเดียวกัน (ภาคผนวก , ภาพที่ ๘9) ซึ่งการดูดซับในแบบไอโซเทอมชนิดที่ 2 เป็นการดูดซับทั้งทางเคมีและกายภาพ ลักษณะไอโซเทอมมีลักษณะคล้ายตัว S (S – shaped isotherm) ซึ่งเป็นการดูดซับที่พบได้ในตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนหรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ (macroporous) จากการที่รูพรุนมีการกระจายขนาดในช่วงกว้าง ดังนั้นการดูดซับจึงเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) ขึ้นอย่างสมบูรณ์ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (ภาพที่ 4.10 จุด A) จากนั้นจำนวนชั้นของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเป็นแบบหลายชั้น (multilayer isotherm) เมื่อความดันสัมพัทธ์ (p/p_0) มีค่าสูงขึ้น (Juszczak et al., 2002)

ในช่วงแรกของกระบวนการดูดซับ ที่ความดันสัมพัทธ์ประมาณ 0.05 และที่ความดันของการดูดซับในช่วงต่ำๆ (~ 0.3) เป็นช่วงของการดูดซับแก๊สแบบชั้นเดียว โมเลกุลของแก๊สจะเรียงตัวบนพื้นผิวของตัวอย่าง เมื่อแก๊สเรียงตัวจนเต็มพื้นที่ผิวของตัวอย่างแล้ว ปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับในช่วงนี้จะถูกนำมาคำนวณเป็นพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างด้วยสมการ BET โดยกราฟ BET (ภาคผนวก, ภาพที่ ๘8) นอกจากนี้ลักษณะของไอโซเทอม (ภาพที่ 4.10) ยังสามารถสันนิษฐานได้ว่ารูที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวอย่างมีลักษณะเป็นแบบกรวย (Juszczak et al., 2002)



ภาพที่ 4.10 ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption) และการคายซับ (Desorption) แก๊สไนโตรเจนของตัวอย่างสตาร์ซมันส์สำหรับหลัง และ A แสดงจุดเปลี่ยนของกราฟ เมื่อการดูดซับแบบชั้นเดียวเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

ตารางที่ 4.6 ปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ, ปริมาตรของรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน ของสตาร์ซมันส์สำหรับหลังดิบ (Native), สตาร์ซที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA), สตาร์ซที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG), สตาร์ซที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA+AMG), สตาร์ซที่ย่อยด้วยกรด (AS), และ สตาร์ซที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball mill (ASBM)

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)	ปริมาตรของรูพรุน (cm ³ /g)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน (nm)
Native	0.15	0.03	1.64
AA	0.64	0.15	12.23
AMG	1.66	0.38	21.12
AA+AMG	1.35	0.31	17.12
AS	1.25	0.29	21.87
ASBM	3.58	0.82	47.11

4.6.2 ปริมาณของพื้นที่ผิวจำเพาะ, ปริมาตรของรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน

ผลการวิเคราะห์ปริมาณของพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน เมื่อคำนวณจากส่วนของเส้นตรงที่ได้จากไอโซเทอมการดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์

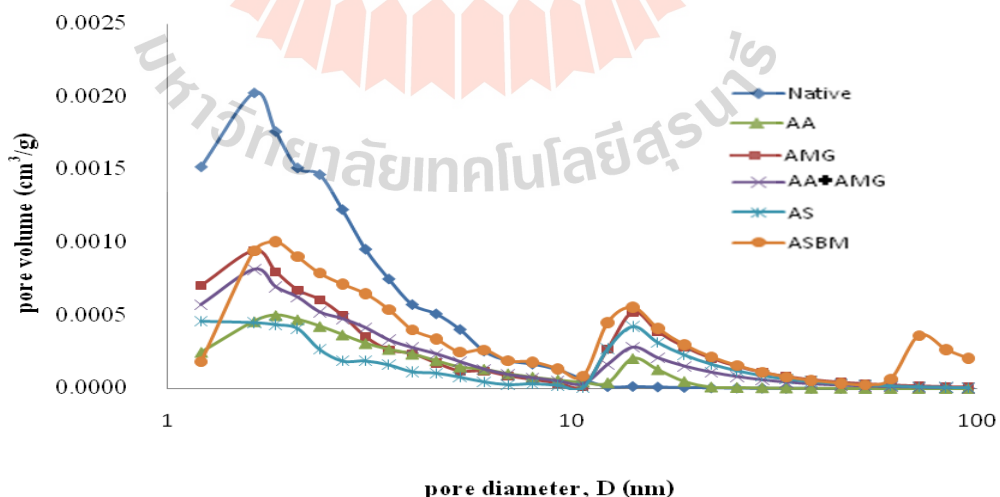
ระหว่าง 0.05 – 0.25 ด้วยสมการ BET แสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่า เมื่อนำสสารไขมันสำปะหลังดิบ มาตัดแปรรูปด้วยวิธีการต่างๆ สสารไขมันหลังการตัดแปรรูปจะมีปริมาณของพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่าง โดยก่อนการตัดแปรรูปนั้น สสารไขมันสำปะหลังดิบ มีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ที่ $0.15 \text{ m}^2/\text{g}$, มีปริมาตรของรูพรุน $0.03 \text{ cm}^3/\text{g}$ และรูพรุนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.64 nm ซึ่งจากการศึกษาของ Hellman and Melvin (1950) ได้ทำการตรวจสอบพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีการดูดซับไนโตรเจน พบว่าสสารไขมันสำปะหลังมีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ที่ $0.28 \text{ m}^2/\text{g}$ ทั้งนี้ปริมาณพื้นที่ผิวที่เกิดขึ้นอาจแปรผันตามถิ่นกำเนิดและสายพันธุ์ของสสารไขมัน นอกจากนี้หากจำแนกขนาดของรูพรุนตามวิธีของ IUPAC สสารไขมันสำปะหลังก่อนการตัดแปรรูปจะมีรูพรุนเป็นแบบ micropore คือ มีรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 nm (Sing, 1985)

เมื่อตัดแปรรูปสสารไขมันด้วยวิธีการต่างๆ พบว่าตัวอย่างที่ถูกตัดแปรรูปมีการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน ดังแสดงในตารางที่ 4.6 หลังการตัดแปรรูป ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนที่เพิ่มขึ้นเมื่อจำแนกตามวิธีของ IUPAC แล้ว รูพรุนที่มีขนาดเพิ่มขึ้นเป็นรูพรุนชนิด mesopore คือ มีความกว้างของรูพรุนเฉลี่ยอยู่ระหว่าง $2 - 50 \text{ nm}$ (Sujka and Jamroz, 2006) ตัวอย่างที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดต่อด้วย ball mill มีการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะ, ปริมาตรของรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนมากที่สุด เนื่องจากวิธีการที่ใช้ตัดแปรรูปนี้มีสถานะที่รุนแรง ทำให้สสารไขมันแตกเป็นเศษชิ้นส่วนเล็กๆ และมีพื้นที่ผิวที่ขรุขระเป็นอย่างมาก (ภาพที่ 4.7 F1 และ F2) พื้นที่ผิวจำเพาะจึงเพิ่มขึ้นมากเช่นกัน ส่วนตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียงอย่างเดียว, ตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์ผสม และตัวอย่างที่ย่อยด้วยกรด มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่าตัวอย่างที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดต่อด้วย ball mill ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเพียงอย่างเดียว มีการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะ, ปริมาตรของรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนน้อยที่สุด ค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและปริมาตรของรูพรุนนั้นมีความสัมพันธ์กัน ซึ่งทำให้สามารถสันนิษฐานลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นได้ จากตารางที่ 4.6 พบว่าตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเพียงอย่างเดียว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนและปริมาตรของรูพรุนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ตัดแปรรูปด้วยวิธีอื่น ๆ ซึ่งสอดคล้องกับภาพ SEM ภาพที่ 4.7 B1, B2 และ ภาพที่ 4.8 B โดยตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเพียงอย่างเดียวนี้ มีรูปร่างไม่แตกต่างไปจากสสารไขมัน และยังปรากฏรูขนาดเล็กบนพื้นผิว ซึ่งไม่มีรูขนาดใหญ่เกิดขึ้น ซึ่งรูพรุนที่เกิดขึ้นนี้ อาจมีลักษณะที่แคบและตื้น ขณะที่ตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียงอย่างเดียว จะเกิดรูพรุนที่มีความกว้างและลึกซึ่งสอดคล้องกับภาพ SEM ภาพที่ 4.7 C1, C2 และภาพที่ 4.8 C ส่วนตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์ผสม จะมีลักษณะรูพรุนเฉลี่ยที่แคบและลึก และตัวอย่างที่ย่อยด้วยกรดมีลักษณะเป็นหลุมที่ตื้นและกว้าง ดังภาพ SEM ภาพที่ 4.8 E ดังนั้นจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า วิธีการตัดแปรรูปที่แตกต่างกันมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะ, ปริมาตรของรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนที่แตกต่างกัน

4.6.3 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของสสารไขมันก่อนและหลังการตัดแปรรูป

เมื่อนำผลการดูดซับแก๊สไนโตรเจนมาคำนวณตามวิธีของ Barret-Joyner-Halenda (BJH) (Barret et al., 1951) เพื่อหารูปแบบการกระจายตัวตามขนาดของรูพรุน ผลการวิเคราะห์

แสดงดังภาพที่ 4.11 จากผลการทดลองพบว่า สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุน ในช่วงต่ำกว่า 2 nm หรือช่วงของ micropore มากที่สุด การกระจายตัวของรูพรุนสูงสุดมีขนาด 1.64 nm นอกจากนี้ยังไม่ปรากฏการกระจายตัวในช่วงที่มากกว่า 10 nm อีกด้วย ซึ่งผลที่เกิดขึ้นนี้ สอดคล้องกับการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนด้วยวิธี BET โดยตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนอยู่ที่ 1.64 nm (ตารางที่ 4.6) หลังจากการตัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีต่างๆ พบว่า รูขนาดเล็กระดับ micropore มีปริมาณลดลง แต่มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนในช่วงมากกว่า 10 nm หรือช่วงของ mesopore เพิ่มขึ้น ซึ่งการตัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีที่ต่างกันจะมีผลต่อการกระจายขนาดของรูพรุนแตกต่างกันด้วย โดยตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเพียงอย่างเดียว มีการกระจายขนาดรูพรุนในช่วง 10 – 50 nm น้อยที่สุด แต่ในช่วง 1.2 – 10 nm มีการกระจายขนาดรูพรุนใกล้เคียงกับตัวอย่างสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด แต่อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างที่ย่อยด้วยกรด มีการกระจายตัวของรูพรุนในช่วง 10 – 50 nm มากกว่าตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเพียงอย่างเดียวและตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์ผสม ส่วนตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสเพียงอย่างเดียว มีการกระจายขนาดของรูพรุนในช่วง 1.2 – 10 nm และ 10 – 50 nm สูงที่สุดเมื่อเทียบกับการย่อยสตาร์ชด้วยวิธีอื่นๆ สำหรับการย่อยสตาร์ชด้วยกรดแล้วบดต่อด้วย ball mill มีผลต่อการกระจายตัวของขนาดรูพรุนแตกต่างไปจากวิธีอื่น โดยมีการกระจายแบ่งออกเป็นสามช่วงคือ 1.2 – 10 nm, 10 – 50 nm และมากกว่า 50 nm หรือรูพรุนแบบ macropore ซึ่งเกิดจากการที่อนุภาคขนาดเล็ก ที่แตกออกเนื่องจากกระบวนการบดกลับมาหลอมรวมกัน กลายเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้เกิดรูหรือช่องขนาดใหญ่ (pore between agglomerates of granule) (Sujka and Jamroz, 2006) ซึ่งสอดคล้องกับภาพ SEM ภาพที่ 4.7 F1, F2 และภาพที่ 4.8 F นั้นแสดงว่า การตัดแปรสตาร์ชด้วยการใช้กรดร่วมกับ ball mill ทำให้สตาร์ชเกิดรูพรุนขนาด mesopore และ macropore ดังนั้นวิธีการตัดแปรสตาร์ชที่แตกต่างกันจะมีผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะ, ปริมาตรของรูพรุน, เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน และการกระจายขนาดของรูพรุนที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.11 การกระจายตัวตามขนาดของรูพรุนของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA+AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS), และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball mill (ASBM)

4.7 สีของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชดัดแปร

สีของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชที่ถูกดัดแปร เมื่อตรวจสอบด้วยเครื่อง Hunter colorimeter และแปรผลเป็นค่าความขาวแล้ว พบว่า สตาร์ชมันสำปะหลังดิบมีค่าความขาวอยู่ที่ 98.97 และสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปร มีค่าความขาวไม่แตกต่างกันไปจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ แ 51 เห็นว่าการดัดแปรพื้นผิวสตาร์ชโดยการย่อยด้วยเอนไซม์ ย่อยด้วยกรด และการนำสตาร์ชไปบดด้วย ball mill ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความขาวของสตาร์ช ซึ่งค่าความขาวแสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สีของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะ มิเลส (AA+AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS), และ สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบด ด้วย ball mill (ASBM)

ตัวอย่าง	ค่าความขาว
Native	98.97 ± 0.21 ^a
AA	98.56 ± 0.32 ^a
AMG	98.01 ± 0.15 ^a
AA+AMG	98.04 ± 0.11 ^a
AS	97.98 ± 0.22 ^a
ASBM	98.07 ± 0.26 ^a

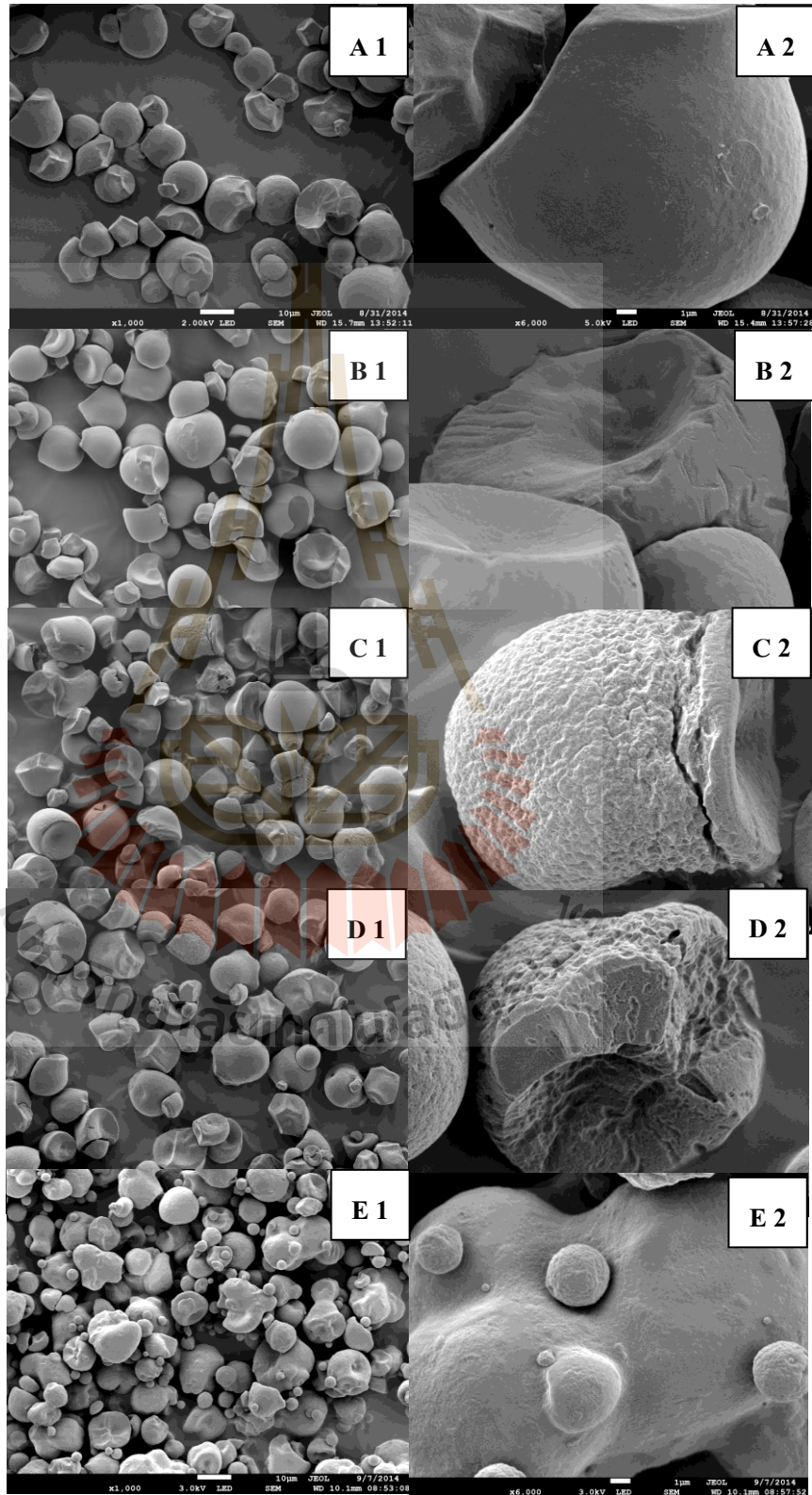
4.8 ผลของการเตรียมไพโรเดกซ์ตริน (เดกซ์ตรินด้านทานการย่อย) จากสตาร์ชดัดแปรต่อคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ

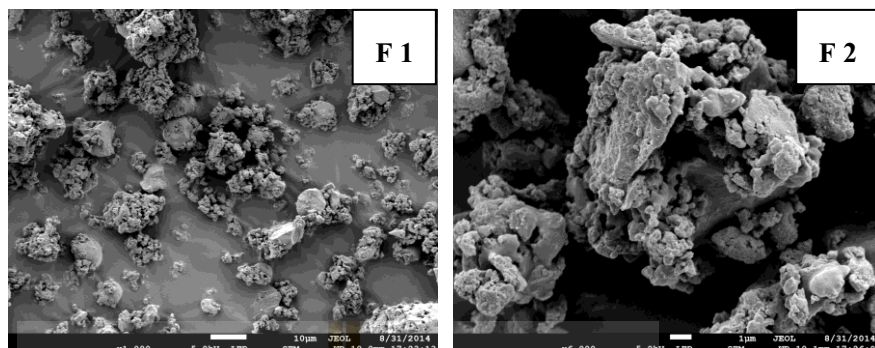
สตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยว, แบบผสม, ย่อยด้วยกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด 6 ชั่วโมงและบดต่อด้วย ball mill เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตเป็นไพโรเดกซ์ตรินหรือเดกซ์ตรินด้านทานการย่อย ด้วยวิธีเดกซ์ตรินไนเซชันหรือ pyroconversion ซึ่งเป็นการใช้ความร้อนสูงร่วมกับกรดในการดัดแปรสตาร์ชที่มีความชื้นต่ำ ตามวิธีการที่เหมาะสมซึ่งได้คัดเลือกมาจากข้อ 4.1

4.8.1 ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของเดกซ์ตรินด้านทานการย่อย

หลังจากนำสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชดัดแปรมาผ่านกระบวนการเดกซ์-ตรินไนเซชัน เมื่อตรวจสอบลักษณะรูปร่างด้วย SEM ที่กำลังขยาย 1,000 และ 6,000 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 4.12 พบว่า การให้ความร้อนสูงร่วมกับการใช้กรดช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาในสภาวะที่มีความชื้นต่ำนั้น ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางลักษณะ และรูปร่างของเม็ดสตาร์ชที่ถูกนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมเดกซ์ตรินด้านทานการย่อย ซึ่งผลที่ได้นี้ มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Laurentin et al. (2003) ที่ได้นำสตาร์ชต่างชนิดกันมาผ่านกระบวนการเดกซ์ตรินไนเซชัน แล้วตรวจสอบลักษณะรูปร่างของสตาร์ชก่อนและหลังผ่านกระบวนการ ซึ่งไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางลักษณะและรูปร่างของสตาร์ช แต่หลังจากนำไปละลายน้ำและทำแห้งโดยวิธีการระเหิดแห้ง (freeze dry) พบว่า

ตัวอย่างที่มีการสูญเสียความสามารถในการคงรูปของเม็ดสตาร์ชไปอย่างรวดเร็วกลายเป็นแผ่นที่แผ่ออก (flake) และไม่กลับมารวมตัวกันอีก





ภาพที่ 4.12 ลักษณะรูปร่างของเดกซ์ตรินด้านทานการย่อย ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 1,000 (1) และ 6,000 (2) เท่า: A) สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ, B) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส, C) ที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส, D) สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส, E) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด และ F) สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดและบดด้วย ball mill

4.8.2 ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของเดกซ์ตรินด้านทานการย่อย

ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของเดกซ์ตรินด้านทานการย่อยด้วยเทคนิค XRD แสดงดังภาพที่ 4.13 โดย XRD pattern ของเดกซ์ตรินด้านทานการย่อย หลังผ่านกระบวนการเดกซ์ตรินไนเซชัน ยังคงแสดงโครงสร้างผลึกเป็นแบบ A และตัวอย่างสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball mill นั้นมีลักษณะทางโครงสร้างผลึก แบบ A ร่วมกับแบบ V สตาร์ช เหมือนตอนเริ่มต้น แต่อย่างไรก็ตาม พีคของทุกตัวอย่างมีความสูงลดลง นอกจากนี้ พีคคู่ (Double peak) ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 10° , 11° และ 17° , 18° ปรากฏลักษณะที่รวมกันกลายเป็นพีคเดี่ยว ยกเว้นตัวอย่างที่ย่อยด้วยกรดและบดด้วย ball mill ที่ยังคงลักษณะรูปแบบของพีคไม่แตกต่างไม่จากก่อนการผ่านกระบวนการเดกซ์ตรินไนเซชัน แสดงให้เห็นว่า กระบวนการเดกซ์ตรินไนเซชันไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกของสตาร์ชซึ่งยังคงแสดงแบบ A และแบบ A ร่วมกับแบบ V ผลการทดลองนี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Kwon et al. (2005) โดยการนำสตาร์ชข้าวฟ่างข้าวเหนียว (waxy sorghum starch) มาผ่านกระบวนการเดกซ์ตรินไนเซชัน และตรวจสอบโครงสร้างผลึกแล้วพบว่า ลักษณะ XRD pattern ยังคงแสดงเป็นแบบ A แต่ความสูงของพีคที่เกิดขึ้นนั้นลดลง นอกจากนี้ Yanjie et al. (2014) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวในระหว่างการทำความร้อนของกระบวนการเดกซ์ตรินไนเซชัน ซึ่งพบว่าบริเวณผลึกของสตาร์ชมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยปริมาณและขนาดของผลึกจะลดลงเมื่อให้ความร้อนเป็นเวลานานขึ้น แต่การจัดเรียงตัวของโครงสร้างในแนวรัศมีของสตาร์ชโมเลกุลไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างกระบวนการเดกซ์ตรินไนเซชัน เพราะเมื่อตรวจสอบภายใต้กล้องโพลาไรซ์ยังปรากฏลักษณะของ birefringence อย่างชัดเจน

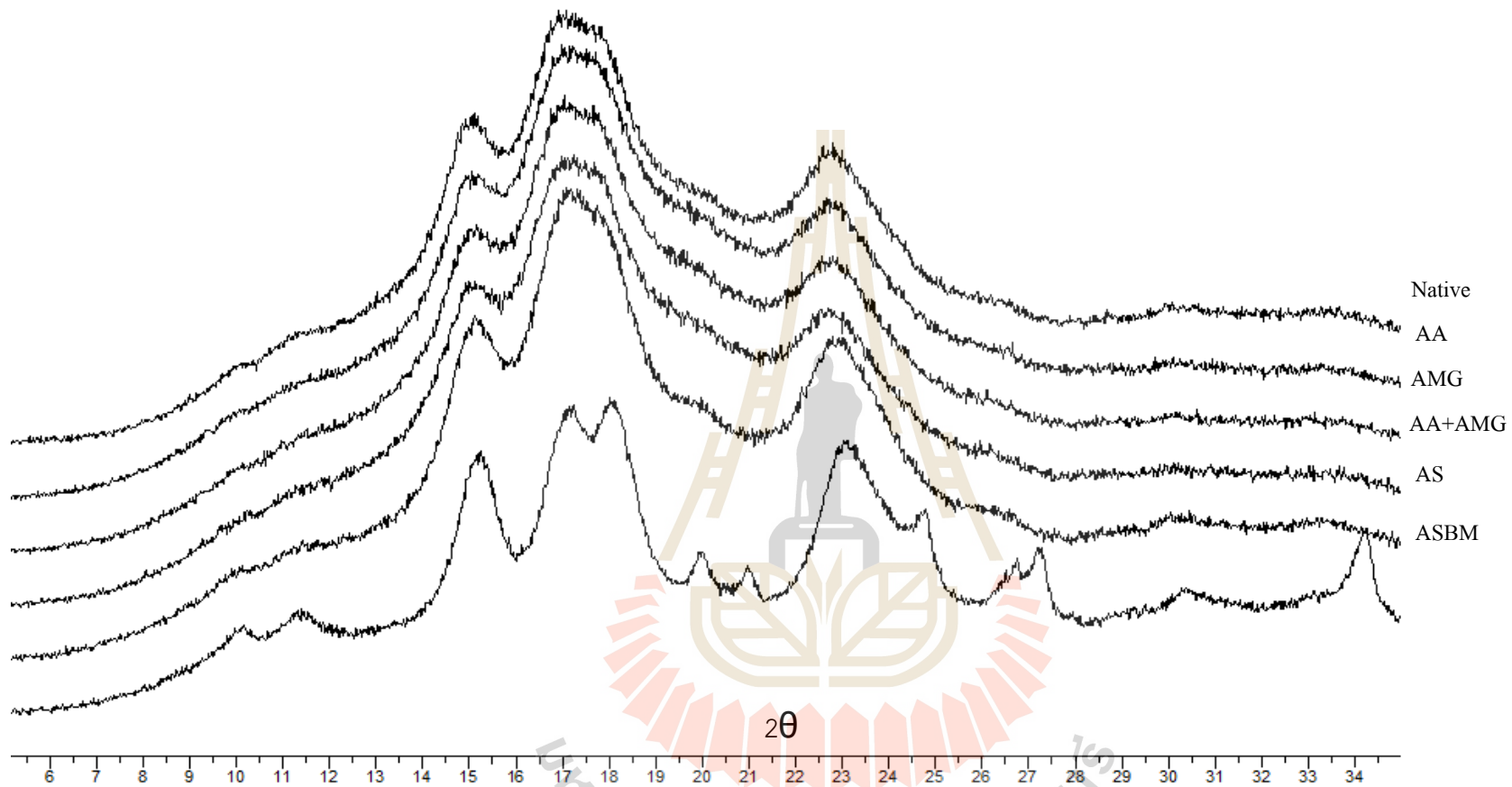
เมื่อคำนวณปริมาณผลึกของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชันแล้ว พบว่าทุกตัวอย่างมีปริมาณผลึกลดลง (แสดงดังตารางที่ 4.7) เนื่องจากกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชันอาจไปทำลายโครงสร้างผลึกของตัวอย่าง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Laurentin et al. (2003), Kwon et al (2005) และ Yanjie et al. (2014) และตัวอย่างที่ตัดแปรโดยการย่อยด้วย มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณผลึกมากที่สุด รองลงมาคือตัวอย่างที่มีการตัดแปรโดยใช้กรด เนื่องจากเอนไซม์สามารถเข้าไปทำลายส่วนผลึกของสตาร์ชได้มากกว่าการใช้กรด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในตารางที่ 4.4 และเมื่อนำสตาร์ชตัดแปรพื้นผิวมาเตรียมเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้กรดและความร้อนสูง ส่งผลผลึกของตัวอย่างถูกทำลายมากยิ่งขึ้น เนื่องจากความแข็งแรงของโครงสร้างถูกทำลายไปในกระบวนการตัดแปรพื้นผิวก่อนหน้านี้แล้ว

ตัวอย่างที่ตัดแปรโดยใช้กรดและบดด้วย ball mill มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณผลึกน้อยที่สุดหลังผ่านกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชัน ซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากอนุภาคขนาดเล็กของสตาร์ชหลังการบดแล้วกลับมารวมตัวกันใหม่นั้น หินส่วนของผลึกออกมาด้านนอก (ภาพที่ 4.10 F1 และ F2) ทำให้ยากต่อการถูกย่อยด้วยกรด (hydrolysis) และการสลายพันธะด้วยความร้อน (pyrolysis) ในกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชัน จึงทำให้ปริมาณผลึกมีการเปลี่ยนแปลงไปน้อยที่สุด

ตารางที่ 4.8 ปริมาณผลึกของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย หลังกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชัน ของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA+AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS), และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดและบดด้วย ball mill (ASBM)

ตัวอย่าง	ปริมาณผลึก (%)	*ปริมาณการเปลี่ยนแปลงของผลึก (%)
Native	20.27 ± 0.08 ^c	17.53
AA	20.68 ± 0.08 ^c	6.97
AMG	18.46 ± 0.45 ^d	27.15
AA+AMG	18.17 ± 0.13 ^d	16.96
AS	26.02 ± 0.68 ^b	25.40
ASBM	30.74 ± 0.38 ^a	1.00

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



ภาพที่ 4.13 ลักษณะโครงสร้างผลึกของเดกซ์ทรินต้านทานการย่อย ที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA+AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS), และ สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball mill (ASBM)

4.8.3 สีของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย

ค่าความขาว (Whiteness) ของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และตัดแปรด้วยวิธีการต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.8 โดยสตาร์ชมันสำปะหลังดิบเริ่มต้นที่ยังไม่ผ่านกระบวนการตัดแปรใดๆ มีค่าความขาวอยู่ที่ 98.87 แต่เมื่อนำสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรมาเตรียมเป็นเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย โดยผ่านการให้ความร้อนสูงร่วมกับการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว พบว่าความขาวของเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยมีค่าลดลง ซึ่งการศึกษาของ Laurentin et al. (2003) และ Campechano-Carrera et al. (2007) ได้อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของสีหลังกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชันไว้ว่า การเปลี่ยนแปลงของสีนั้นขึ้นอยู่กับสถานะของกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชันโดยตรง หากสถานะในการผลิตรุนแรง (ใช้กรดเข้มข้น, ความร้อนสูง และให้ความร้อนเป็นเวลานาน) ก็จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความขาวลดลง และสีที่เข้มขึ้นอาจเป็นส่วนที่กลายเป็นถ่าน (char) และสีน้ำตาลที่เกิดจากปฏิกิริยาการคาราเมลไลเซชัน (Caramelization reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการให้ความร้อนแก่น้ำตาลในสถานะที่ไม่มีสารประกอบไนโตรเจน ซึ่งพอลิเมอร์ของน้ำตาลจะเกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อน แล้วมีการสูญเสียน้ำ (dehydration) เกิดขึ้น จากนั้นจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ ได้เป็น 3-deoxy-D-glucosone น้ำตาลที่เกิดปฏิกิริยาการคาราเมลไลเซชันโดยทั่วไปจะมีโครงสร้างอยู่ในรูปของน้ำตาลมอโนแซ็กคาไรด์ โดยขั้นตอนแรกของปฏิกิริยาจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ภายในโมเลกุล (intramolecular rearrangements) ซึ่งหมู่อัลดีไฮด์หรือคีโตน และหมู่ไฮดรอกซิลจะเกิดปฏิกิริยากันเองภายในสายโมเลกุลเดียวกัน นอกจากนี้จะมีการปลดปล่อยไฮโดรเจนไอออน (H^+) ทำให้ค่าพีเอชลดลง เกิดเป็นสารประกอบคาร์บอนิลซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิดสีน้ำตาล, กลิ่นคาราเมล และยังเกี่ยวข้องกับการเกิดสารประกอบเฮเทอโรไซคลิก ได้แก่ HMF, HDF (hydroxysimethyl furanone) และ HAF (hydroxyacetyl furan) ดังนั้นการที่ค่าความขาวของตัวอย่างที่ตัดแปรโดยใช้เอนไซม์และกรดก่อนนำมาผ่านกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชันมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าการตัดแปรพื้นผิวของสตาร์ชโดยใช้เอนไซม์และการใช้กรดนั้น เป็นการเพิ่มความรุนแรงของสถานะการผลิตทางหนึ่ง โดยไม่ต้องเพิ่มความเข้มข้นของกรด หรือเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนในกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชัน ส่วนตัวอย่างเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ มีค่าความขาวลดลงไปเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่า กระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชัน เกิดขึ้นไม่รุนแรงมากเมื่อเทียบกับตัวอย่างสตาร์ชที่ตัดแปรพื้นผิวโดยใช้เอนไซม์และกรดก่อนการนำมาผลิตเป็นเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย แต่อย่างไรก็ตาม การตัดแปรพื้นผิวให้มีขนาดเล็กและสูญเสียรูปร่างความเป็นแกรนูลของสตาร์ชไปโดยการตัดแปรพื้นผิวสตาร์ชด้วยการย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball mill นั้นส่งผลให้กระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชัน เกิดขึ้นได้ไม่ดี หรือเกิดขึ้นได้น้อยมาก ค่าความขาวจึงลดลงไปเพียงเล็กน้อยและมีค่าความขาวไม่แตกต่างจากการเตรียมเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ

ตารางที่ 4.9 ค่าความขาวของเดกซ์ตรินต้านทานการย่อยที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Dextrinized Native), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA+AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS), และ สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball mill (ASBM)

ตัวอย่าง	ค่าความขาว
* Native	98.97 ± 0.21 ^a
Dextrinized Native	95.17 ± 0.89 ^b
AA	70.13 ± 0.09 ^d
AMG	70.92 ± 0.09 ^d
AA+AMG	70.68 ± 0.41 ^d
AS	72.58 ± 0.96 ^c
ASBM	95.95 ± 0.72 ^b

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

* Native หมายถึง สตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ไม่ผ่านกระบวนการใดๆ

4.8.4 การละลายน้ำของเดกซ์ตรินต้านทานการย่อย

ผลการทดสอบการละลายน้ำของเดกซ์ตรินต้านทานการย่อยที่อุณหภูมิห้อง พบว่า ตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเดกซ์ตรินในเซชัน มีความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ สตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ ซึ่งสามารถละลายน้ำได้เพียง 0.81% เนื่องจากในระหว่างกระบวนการเดกซ์ตรินในเซชันนั้นมีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างในระดับโมเลกุลของ สตาร์ช 3 ปฏิกิริยาหลักๆ ที่สำคัญคือ การย่อย (hydrolysis), การจัดพันธะของกลูโคสใหม่ (transglucosidation) และการเกิดพอลิเมอร์ใหม่ (repolymerization) ของกลูแคน (Huber and BeMiller, 2000) ซึ่งการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลของสตาร์ชอย่างต่อเนื่องโดยอิทธิพลของกรดและความร้อน ส่งผลให้ตัวอย่างสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้น (Laurentin et. al., 2003) จากผลการทดลองตารางที่ 4.9 พบว่า หลังจากนำสตาร์ชมาเตรียมเป็นเดกซ์ตรินต้านทานการย่อยแล้ว สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ สามารถละลายน้ำได้ดีที่สุดคือ 93.39% อาจเกิดจากการสตาร์ชมันสำปะหลังถูกทำลายน้อยที่สุด เนื่องจากผ่านกระบวนการน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่นที่ผ่านกระบวนการตัดแปรพื้นผิวมา จึงอาจส่งผลให้การลดลงของน้ำหนักโมเลกุลโดยการถูกย่อยด้วยกรด (hydrolysis) และความชื้น (pyrolysis) ที่เกิดขึ้นน้อย และไม่มีส่วนของถ่านที่เกิดจากความรุนแรงของสภาวะการผลิตเกิดขึ้น เมื่อพิจารณาประกอบกับค่าความขาว (ตารางที่ 4.8)

ตารางที่ 4.10 ความสามารถในการละลายน้ำของเดกซ์ทรินต้านทานการย่อยที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Dextrinized Native), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA+AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS), และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball mill (ASBM)

ตัวอย่าง	การละลาย (%)
* Native	0.81 ± 0.36 ^e
Dextrinized Native	93.39 ± 0.05 ^a
AA	85.62 ± 0.49 ^b
AMG	85.43 ± 0.50 ^b
AA+AMG	84.98 ± 0.42 ^b
AS	77.85 ± 0.62 ^c
ASBM	23.40 ± 0.21 ^d

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

* Native หมายถึง สตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ไม่ผ่านกระบวนการใดๆ

สำหรับสตาร์ชที่ตัดแปรด้วยเอนไซม์ทั้งแบบเดี่ยวและแบบผสมเมื่อนำมาเตรียมเป็นเดกซ์ทรินต้านทานการย่อยแล้วมีการละลายน้ำไม่แตกต่างกัน ส่วนตัวอย่างที่ตัดแปรโดยใช้กรด มีการละลายน้อยกว่าการใช้เอนไซม์และตัวอย่างที่ไม่มีการตัดแปร ตามรายงานการศึกษาของ Kwon et al. (2005) ได้กล่าวไว้ว่า ความสามารถในการละลายน้ำที่ลดลงของเดกซ์ทริน อาจเป็นผลมาจากกลุ่มแคนสายสั้น ๆ ที่เกิดจากสตาร์ชถูกไฮโดรไลซ์บางส่วนในขั้นตอนการตัดแปรพื้นผิว บางส่วนเกิดการไหม้ในระหว่างการให้ความร้อนที่สูงและเป็นเวลานาน ทำให้เกิดเป็นสารที่ไม่ใช่สตาร์ช (non - starch) ซึ่งอาจได้เป็นถ่าน (char) ซึ่งสอดคล้องกับค่าความขาวที่ลดลง (ตารางที่ 4.8) นอกจากนี้ตัวอย่างสตาร์ชที่ตัดแปรด้วยกรดแล้วบดด้วย ball mill นั้น มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับเดกซ์ทรินต้านทานการย่อยตัวอื่น ทั้งนี้อาจเกิดจากตัวอย่างสตาร์ชที่ตัดแปรด้วยกรดแล้วบดด้วย ball mill อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาทางเคมีในกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชันได้ไม่เต็มที่ โดยสังเกตได้จากปริมาณผลึกที่มีการเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยหลังกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชัน (ตารางที่ 4.7) ซึ่งนอกจากปริมาณผลึกที่ลดลงไปเพียงเล็กน้อยแล้ว ปริมาณผลึกคงเหลือยังมากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่น อาจเป็นไปได้ว่าปริมาณของผลึกและขนาดโมเลกุลของสตาร์ชที่เปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยส่งผลให้ความสามารถในการละลายน้ำของตัวอย่างสตาร์ชที่ตัดแปรด้วยกรดแล้วบดด้วย ball mill มีความสามารถในการละลายต่ำกว่าตัวอย่างที่ตัดแปรด้วยวิธีอื่น ผลการทดลองนี้

สอดคล้องกับการศึกษาของ Yanjie et al. (2014) ซึ่งพบว่าปริมาณคงเหลือของผลึกหลังกระบวนการเด็กซ์ทรินไนเซชันมีต่อการละลายน้ำของเด็กซ์ทริน

4.8.5 ปริมาณใยอาหารของเด็กซ์ทรินต้านทานการย่อย

ปริมาณใยอาหารของเด็กซ์ทรินต้านทานการย่อย ตรวจสอบตามวิธีการของ AOAC 2009.01 และ 2011.25 ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ปริมาณใยอาหารทั้งหมดรวมถึงแป้งต้านทานการย่อย (Resistant Starch, RS) และสารจำพวกโอลิโกแซคคาไรด์ที่ไม่ถูกย่อย (Non – digestible oligosaccharide, NDO) ที่มีระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP) มากกว่า 3 หน่วยขึ้นไป ส่วนของใยอาหารที่ละลายน้ำได้มวลโมเลกุลสูง (High molecular weight soluble dietary fiber, HMWDF) จะถูกตกตะกอนในแอลกอฮอล์ กรองและชั่งน้ำหนัก หลังจากนั้นส่วนของใยอาหารที่ละลายน้ำได้มวลโมเลกุลต่ำ (Low molecular weight soluble dietary fiber, LMWDF) ที่ผ่านการกรองจะถูกนำไปวิเคราะห์ปริมาณใยอาหารด้วย HPLC แล้วนำทั้งสองส่วนมารวมกันเป็นปริมาณใยอาหารทั้งหมด (Total dietary fiber, TDF)

ผลการวิเคราะห์ปริมาณใยอาหารแสดงดังตารางที่ 4.10 จากผลการทดลองพบว่าสตาร์ชที่ผ่านกระบวนการเด็กซ์ทรินไนเซชัน มีปริมาณใยอาหารเพิ่มขึ้นจากปริมาณใยอาหารเริ่มต้นเป็นอย่างมาก โดยสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ไม่ผ่านกระบวนการใดๆ มีปริมาณใยอาหารเพียง 2.44 % และยังไม่พบว่ามีใยอาหารมวลโมเลกุลต่ำอีกด้วย โดยที่หลังจากนำสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชที่ถูกดัดแปรด้วยวิธีการต่างๆ มาเตรียมเป็นเด็กซ์ทรินต้านทานการย่อย พบว่าทุกตัวอย่างมีปริมาณใยอาหารเพิ่มขึ้นทั้งส่วนของใยอาหารที่ละลายน้ำได้มวลโมเลกุลสูงและมวลโมเลกุลต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างกระบวนการเด็กซ์ทรินไนเซชันสตาร์ชจะถูกดัดแปรในสภาวะที่ใช้อุณหภูมิสูง และมีความชื้นต่ำประมาณ 5% นอกจากนี้ยังมีการกระตุ้นปฏิกิริยาโดยการเติมกรดลงไปในตัวอย่าง และหลังจากให้ความร้อนจนครบเวลาตัวอย่างจะถูกทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ในตอนเริ่มต้นของกระบวนการเด็กซ์ทรินไนเซชันโมเลกุลของสตาร์ชจะถูกย่อยแบบสุ่มโดยกรดและความร้อนที่พันธะ α - 1, 4 และ α - 1, 6 พอลิเมอร์ของสตาร์ชจะถูกตัดให้เป็นโอลิโกแซคคาไรด์สายสั้นๆ (short – chain oligosaccharide) ในระหว่างนี้น้ำหนักโมเลกุลของสตาร์ชจะลดลงอย่างต่อเนื่อง จากนั้นจะกลับมาเกิดเป็นพอลิเมอร์ใหม่ในขณะที่ทำให้เย็น พันธะไกลโคซิดิกที่ไม่ถูกย่อย (non – digestible glycosidic bonds) เช่น β - 1, 4; β - 1, 6; α - และ β - 1, 3; 1, 2 จะถูกผลิตในช่วงนี้ ดังนั้นโครงสร้างของเด็กซ์ทรินต้านทานการย่อย จะมีกิ่งก้านมากกว่าสตาร์ช ซึ่งการกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่ของเด็กซ์ทรินต้านทานการย่อย แสดงดังภาพที่ 2.11 A

จากตารางที่ 4.10 พบว่า ตัวอย่างที่ดัดแปรด้วยเอนไซม์แบบเดี่ยว, แบบผสม และการใช้กรด เมื่อนำมาเตรียมเป็นเด็กซ์ทรินต้านทานการย่อยแล้ว มีปริมาณใยอาหารมากกว่าตัวอย่างที่เตรียมจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ ซึ่งส่วนของใยอาหารที่ละลายน้ำได้มวลโมเลกุลสูงของตัวอย่างเตรียมที่ใช้เอนไซม์และกรดนั้นมีปริมาณมากกว่าเด็กซ์ทรินต้านทานการย่อยที่เตรียมจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าการดัดแปรพื้นผิวด้วยเอนไซม์ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวที่ทำให้กรดสามารถเข้าไปย่อยพันธะ α - 1, 4 และ α - 1, 6 ของสตาร์ชได้มากขึ้นจึงส่งผลเกิดเป็น

ตารางที่ 4.11 ปริมาณใยอาหารที่ละลายน้ำได้มวลโมเลกุลสูง (HMWDF), มวลโมเลกุลต่ำ (LMWDF) และปริมาณใยอาหารทั้งหมด (TDF) ของเด็กซ์ทรินต้านทานการย่อย ที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Dextrinized Native), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (AA), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (AA+AMG), สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรด (AS), และสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball mill (ASBM)

ตัวอย่าง	HMWDF	LMWDF	TDF
*Native	2.44 ± 0.10 ^e	Nd	2.44 ± 0.10 ^f
Dextrinized Native	9.72 ± 1.92 ^d	35.38 ± 1.78 ^b	45.10 ± 0.14 ^d
AA	26.67 ± 0.18 ^b	32.32 ± 0.58 ^c	58.99 ± 0.40 ^b
AMG	31.57 ± 1.99 ^a	33.01 ± 1.88 ^c	64.58 ± 0.11 ^a
AA+AMG	26.03 ± 0.29 ^b	30.62 ± 1.23 ^d	56.65 ± 0.94 ^c
AS	21.38 ± 1.22 ^c	37.64 ± 1.32 ^a	59.01 ± 0.10 ^b
ASBM	10.28 ± 0.04 ^d	2.02 ± 1.37 ^e	12.30 ± 1.41 ^e

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) Native หมายถึง สตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ไม่ผ่านกระบวนการใดๆ nd หมายถึง ตรวจสอบไม่พบ

พอลิเมอร์ใหม่ที่มีพันธะ เช่น β -1, 4; β -1, 6; α - และ β -1, 3; 1, 2 มากขึ้น ซึ่งทำให้ต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ได้มากขึ้น โดยการตัดแปรพื้นผิวของสตาร์ชก่อนนำมาเตรียมเป็นเด็กซ์ทรินต้านทานการย่อย ไปเพิ่มปริมาณของปริมาณใยอาหารที่ละลายน้ำได้มวลโมเลกุล แต่ในตัวอย่างที่ตัดแปรโดยใช้กรดแล้วบดด้วย ball mill นั้น พบว่ามีปริมาณใยอาหารต่ำกว่าเด็กซ์ทรินต้านทานการย่อยที่ได้จากสตาร์ชที่ไม่ตัดแปรพื้นผิว ซึ่งอาจเป็นเพราะการตัดแปรสตาร์ชโดยวิธีนี้มีสถานะที่รุนแรงจนทำให้สูญเสียลักษณะความเป็นเม็ดสตาร์ชไปจนกลายเป็นเศษชิ้นส่วนที่มีอนุภาคขนาดเล็ก (small particle) ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า การตัดแปรสตาร์ชให้มีอนุภาคขนาดเล็กนั้นทำให้โครงสร้างของสตาร์ชไม่เหมาะสมต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในระหว่างกระบวนการเด็กซ์ทรินไนเซชัน โดยอาจเกิดการย่อยด้วยกรดและการย่อยด้วยความร้อนได้ไม่ดี ซึ่งดูได้จากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับ ปริมาณผลึกก่อนผ่านกระบวนการเด็กซ์ทรินไนเซชัน และปริมาณใยอาหารหลังจากผ่านกระบวนการเด็กซ์ทรินไนเซชันของตัวอย่างสตาร์ชที่ตัดแปรโดยใช้กรดแล้วบดด้วย ball mill นั้นมีปริมาณน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับเด็กซ์ทรินต้านทานการย่อยที่เตรียมจากสตาร์ชที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า แสดงให้เห็นว่าการจัดพันธะของกลูโคสใหม่

(transglucosidation) และการเกิดพอลิเมอร์ใหม่ (repolymerization) ซึ่งจะทำให้เกิดพันธะใหม่ที่ทนต่อการถูกย่อยด้วยเอนไซม์นั้นเกิดขึ้นได้น้อย จึงส่งผลให้ปริมาณใยอาหารมีปริมาณน้อยกว่า ตัวอย่างเดกซ์ทรินต้านทานการย่อยที่เตรียมจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และตัวอย่างสตาร์ชที่ตัดแปรด้วยวิธีการอื่นๆ

ตัวอย่างที่มีปริมาณใยอาหารมากที่สุดหลังจากการเตรียมเป็นเดกซ์ทรินต้านทานการย่อยคือ ตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลไกลูโคซิเดสเพียงอย่างเดียว ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าพื้นที่ผิว และลักษณะความพรุนของเม็ดสตาร์ชหลังการตัดแปร มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในระหว่างกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชันเกิดขึ้นได้ดี โดยอาจมีพื้นที่ผิว, ความพรุนและขนาดของโมเลกุลสตาร์ชเหมาะต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีในระหว่างกระบวนการเดกซ์ทรินไนเซชัน จึงเกิดการจัดพันธะของกลูโคสใหม่ และเกิดพอลิเมอร์ใหม่ที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณใยอาหารได้ดีกว่าการตัดแปรด้วยวิธีอื่นๆ

บทที่ 5

ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโยอาหารละลายน้ำได้หรือไฟโรเดกซ์ตริน เมื่ออุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น ปริมาณ available starch และความขาวของไฟโรเดกซ์ตรินจะมีค่าลดลง นอกจากนี้อุณหภูมิ ความเข้มข้นของกรด และระยะเวลาในการให้ความร้อน ยังมีผลทำให้ไฟโรเดกซ์ตรินมีค่าความหนืดต่ำด้วย ส่วนความสามารถในการละลายและความชุ่มมีความสอดคล้องกัน โดยไฟโรเดกซ์ตรินที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูงจะแสดงเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านสูงเช่นกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารละลายมีความชุ่มต่ำและมีความใสสูง ยกเว้นไฟโรเดกซ์ตรินที่ผลิตในสภาวะที่รุนแรงเกินไปจะทำให้เกิดพวก non-starch และเกิดการเผาไหม้สูงทำให้ความสามารถในการละลายน้ำและเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านลดลง

การตัดแปรรสตารซ์มันสำปะหลังโดยการใช้เอนไซม์และกรด สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวของสตารซ์ได้ และสตารซ์ยังคงความเป็นแกรนูลอยู่ ซึ่งการตัดแปรรสตารซ์โดยการย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส สามารถตัดแปรรสตารซ์ให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด เมื่อเทียบกับการใช้เอนไซม์ตัวอื่นและการใช้กรด เมื่อนำสตารซ์ที่ตัดแปรรพื้นที่ผิวด้วยเอนไซม์และกรดมาเตรียมเป็นเดกซ์ตรินด้านทานการย่อย พบว่าพื้นที่ผิวของสตารซ์ที่เพิ่มขึ้นจากการตัดแปรรด้วยการใช้เอนไซม์และกรด มีปริมาณโยอาหารสูงกว่าการผลิตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อยจากสตารซ์มันสำปะหลังดิบ โดยเฉพาะการตัดแปรรสตารซ์ด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส เมื่อนำมาผลิตเป็นเดกซ์ตรินด้านทานการย่อยแล้ว มีปริมาณโยอาหารสูงที่สุด

การตัดแปรรสตารซ์มันสำปะหลัง โดยการนำสตารซ์ที่ย่อยด้วยกรดมาบดต่อด้วย ball mill พบว่า สตารซ์มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นมากที่สุด แต่สตารซ์สูญเสียความเป็นแกรนูลไป กลายเป็นเศษชิ้นส่วนขนาดเล็ก ซึ่งเมื่อนำมาผลิตเป็นเดกซ์ตรินด้านทานการย่อยแล้ว มีปริมาณโยอาหารเกิดขึ้นต่ำที่สุด

บรรณานุกรม

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2543). **เทคโนโลยีของแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 2 สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 292.
- วีระยุทธ์ ลอประยูร (2546). **เอกสารประกอบรายวิชา Powder Technology**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุรีย์ พุดระกุล. **ชีวเคมีพื้นฐาน 1**. กรุงเทพฯ, ลิฟวิ้ง, 2528, หน้า 56-59.
- AOAC Official Method 2011.25. (2012). Integrated total dietary fibre assay procedure including resistant starch and non-digestible oligosaccharide. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 1-23.
- Apinan, S., Yujiro, I., Hidefumi, Y., Takeshi, F., Myllarinen, P., Forssell, P., et al. (2007). Visual observation of hydrolyzed potato starch granules by alpha-amylase with confocal laser scanning microscopy. **Starch/Stärke**, 59(11), 543–548.
- Atichokudomchai, N., Shobsngob, S., & Varavinit, S. (2000). Morphological properties of acid modified tapioca starch. **Starch/Stärke**, 52, 283–289.
- Baldwin, P. M., Adler, J., Davies, M. C., & Melia, C. D. (1994). Holes in starch granules: Confocal, SEM, and light microscopy studies of starch granule structure **Starch/Stärke**, 46(9), 341–346.
- Baldwin, P. M., Davies, M. C., & Melia, C. D. (1997). Starch granule surface imaging using low-voltage scanning electron microscopy and atomic force microscopy. **International Journal of Biological Macromolecules**, 21(1–2), 103–107.
- Baldwin, P.M., Adler, J., Davies, M. C., & Melia, C. D. (1998). High resolution imaging of starch granule surfaces by atomic force microscopy. **Journal of Cereal Science**, 27(3), 255–265.
- Barret, E. P ., Joyner, L. G., & Hallenda, P. P. (1951). The determination of pore volume and area distributions in porous substances. I. computations from nitrogen isotherms. **Journal of the American Chemical Society**, 73, 373–380.
- Bello-Perez, L. A., Meza-Leon, K., Contreras-Ramos, S., & Paredes Lopez, O. (2001). Functional properties of corn, banana and potato starch blends. **Acta Cientifica Venezolana**, 52 , 62–67.
- BeMiller J. N., Starch-based gums. (1993). In: **Industrial Gums. Polysaccharides and Their Derivatives** (eds. R.L.Whistler, J.N.BeMiller). Academic Press, San Diego, pp. 579-601.

- Binder Tom P., Buck Allan W., Brent Flickinger, & Sebree Bruce R., Patent Application Publication. High soluble fiber fermented food., **US patent 0118301 A1(2005)**.
- Buléon, A., Colonna, P., Planchot, V. & Ball, S. (1998). Starch granules: Structure and biosynthesis. **International Journal of Biological Macromolecules**, 23, 85–112.
- Calorina, M. C., & Franco, C. M. L. (2010). Effect of acid-ethanol treatment followed by ball milling on structural and physicochemical characteristics of cassava starch. **Starch/Stärke**, 62, 236-245.
- Campechano-Carrera E., Corona-Cruz A., Chel-Guerrero I., & Betancur-Ancona D. (2007). Effect of pyrodextrinization on available starch content of Lima bean (*Phaseolus lunatus*) and cowpea (*Vigna unguiculata*) starches. **Food Hydrocolloids**, 21, 472-479.
- Castro, L., & Aguilera, J. M. (2007). Fracture properties and microstructure of low moisture starch probes. **Drying Technology**, 25(1–3), 147–152.
- Chabot, J. F., Allen, J. E., & Hood, L. F. (1978). Freeze-etch ultrastructure of waxy maize and acid hydrolyzed waxy maize starch granules. **Journal of Food Science**, 43, 727-730, 734.
- Chen, J.-J., Lii, C.-Y., & Lu, S. (2003). Physicochemical and morphological analyses on damaged rice starches. **Journal of Food and Drug Analysis**, 11, 283–289.
- Chulkyoon, M., & Dick, J. W. (1991). Response of starch of different wheat classes to ball milling. **Cereal Chemistry**, 68, 409-412.
- Commission of the European Communities. (2008). **Draft commission directive: Amending directive 90/496/EEC**. <http://www.food.gov.uk/multimedia/pdfs/consultation/cwd>.
- Daniel, J. R., & Whistler, R. L. (1990). Fatty sensory qualities of polysaccharides. **Cereal Foods World**, 35, 825.
- Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for the determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry**, 56, 427–429.
- Fannon, J. F., Hauber, R. J., & BeMiller, J. N. (1992). Surface pores of starch granules. **Cereal Chemistry**, 69, 284–288.

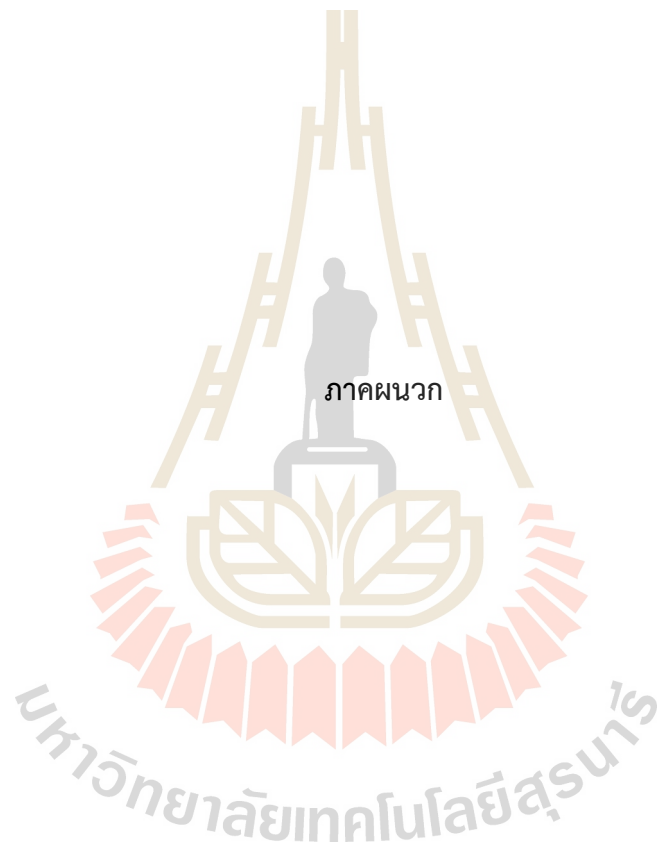
- Forsell, P., Myllärinen, P., Heinämäki, J., Palvainen, P., Yliruusi, J., & Poutanen, K. (1999). Coated starch capsules and a process of producing them. **WO Patent 99525121A1**.
- French, D. (1984). Organization of starch granules. In R. L. Whistler, J. N. BeMiller, & E. F. Paschall (Eds.), **Starch chemistry and technology** (pp. 183–247). Florida, USA: Academic Press.
- Gordon, D. T., & Okuma, K. (2002). Determination of total dietary fiber in selected foods containing resistant maltodextrins by enzymic-gravimetric method and liquid chromatography: collaborative study. **Journal of Official Analytical Chemists**, 85, 435-444.
- Griffin, G. J. L. (1989). **Transport Processes and Unit Operations**. 3rd ed., Prentice Hall PTR, New Jersey. 651.
- Hellman, N. N., & Melvin, E. H. (1950). Surface area of starch and its role in water sorption. **Journal of the American Chemical Society**, 72, 5186–5188.
- Hoover, R., & Vasanthan, T. (1993). Studies on the physicochemical properties of native, defatted and heat-moisture treated pigeon pea (*Cajanus Cajan L*) starch. **Carbohydrate Research**, 246, 185–203.
- Hoover, R., & Vasanthan, T. (1994). The effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of cereal, legume and tuber starches. **Carbohydrate Research**, 252, 33–53.
- Huber, K. C., & BeMiller, J. N. (2000). Channels of maize and sorghum starch granules. **Carbohydrate Polymers**, 41, 269–276.
- Inouchi, N., Glover, D. V., & Fuwa, H. (1987). Properties of residual maize starches following acid hydrolysis. **Starch/Stärke**, 39(8), 284–288.
- Jane, J., Wong, K. S., & McPherson, A. E. (1997). Branch structure different in starches of A and B type X-ray patterns revealed by their Naegeli dextrans. **Carbohydrate Research**, 300, 219–227.
- Jayakody L., & Hoover, R. (2002) The effect of lintnerization on cereal starch granules. **Food Research International**, 35, 665-680.
- Juszczak, L., Fortuna, T., and Wodnicka, K. (2002). Characteristics of cereal starch granules surface using nitrogen adsorption. **Journal of Food Engineering**, 54(2), 103–110.

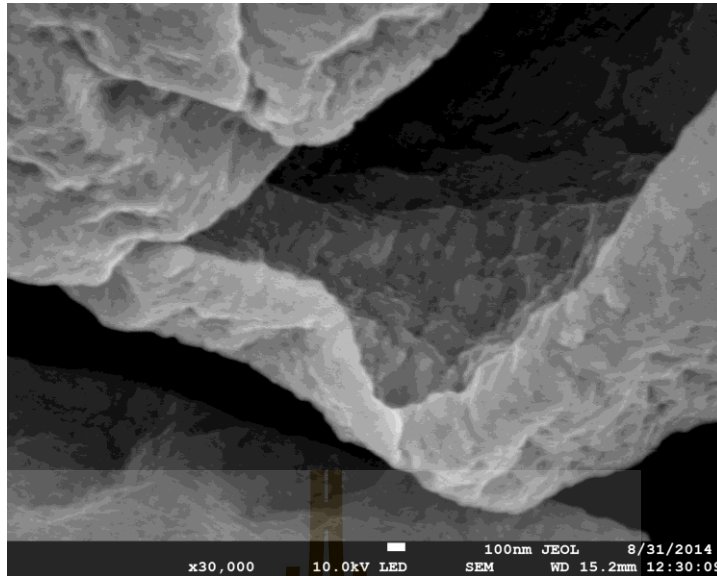
- Kainuma, K., & French, D. (1971). Nageli amyloextrin and its relationship to starch granule structure. I. Preparation and properties of amyloextrins from various starch types. **Biopolymer**, 101, 1673-1680.
- Kobayashi, S., Miwa S., & Suzuki, W. (1992). Method of preparing modifies starch granules. **European Patent 0539910A1**.
- Kwon, S. K., Chung, K. M., Shin, S. I., & Moon, T. W. (2005). Contents of indigestible fraction, water solubility, and color of pyrodextrins made from waxy sorghum starch. **Cereal Chemistry**, 82, 101-104.
- Laurentin, A., Cardenas, M., Ruales, J., Perez, E., & Tovar, J. (2003). Preparation of indigestible pyrodextrins from different starch sources. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 51(18), 5510-5515.
- Lefranc-Millot. (2006). "Effects of a Soluble Fiber with Excellent Tolerance, NUTRIOSE FB06, on the Gut Ecosystem: A Review," presented at Dietary Fibre 2006, Helsinki, Finland, June 12-14, 2006.
- Leloup, V. M., Colonna, P., & Ring, S. G. (1990). Studies on probe diffusion and accessibility in amylose gels. **Macromols**, 23, 862-866.
- Leszczynski, W. (2004). Resistant starch – classification, structure, production. **Polish Journal of Food and Nutrition Sciences**, 13/54, SI 1, 37-50.
- Lintner, C. J. (1886). Studien uber diastase. **Journal fur praktische Chemie**, 34, 378-386.
- Lim, S., Jane, J., Rajagopalan, S., & Seilb, P. A. (1992). Effect of starch granule size on physical properties of starch-filled polyethylene film. **Biotechnology Progress**, 8, 51-57.
- McClain James A., United State Patent. Method of producing resistant starch, **US patent 7,605,254 B2 (2009)**.
- Morrison, W. R., & Tester, R. F. (1994). Properties of damaged starch granules. II. Crystallinity, molecular order and gelatinization of ball-milled starches. **Journal of Cereal Science**, 19, 209-217.
- Myllarinen, P., Forsell, P., von Wright, A., Alader, M., Mattila-Sandhol, T., & Poutanen, K. (1999). Starch capsules containing micro organisms and/or polypeptides or proteins and process of producing them. **WO 9952511A1**.
- Nageli, C. W. (1874). Beitäge zur naheren kenntniss der starke grupe. **Annalen der chemie**, 173, 218-227.

- Ohkuma, K., Wakabayashi, S., (2001). Fibersol-2: A soluble, non-digestible, starch-derived dietary fibre. In: **Advanced Dietary Fibre Technology** (eds. B.V. McCleary, I. Prosky). Blackwell Science Ltd., Oxford, pp. 509-523.
- Pasman, W., Wils, D., Saniez, M. H., & Kardinaal, A. (2006). Long-term gastrointestinal tolerance of NUTRIOSE FB in healthy men. **European Journal of Clinical Nutrition**, 60(8), 1024-1034.
- Popplewell, L. M., & Peleg, M. (1989). Theoretical comparison of two segregation indices for binary powder mixtures. **Powder Technology**, 58: 55.
- Radley, J. A. (1968). **Starch and its derivatives**. 4th ed. London: Richard Clay, p. 203.
- Rahman, M. S. (2001). Toward prediction of porosity in foods during drying: a brief review. *Drying Technology*, 19(1), 1–13
- Ohkuma, K., Yoshio, H., Kazuyuki, I., Isao, M., and Yasuo, K., Indigestible dextrins. (1994). **US Patent 5364652**.
- Roberfroid, M. B. (1999). Concepts in functional foods: the case of inulin and oligofructose. **Journal of Nutrition**, 129, 1398S-1401S.
- Robin, J. P., Mercier, C., Charbonniere, R., & Guilbot, A. (1974). Lintnerized starches: gel filtration and enzymatic studies of insoluble residues from prolonged acid treatment of potato starch. **Cereal Chemistry**, 51, 389–406.
- Robin, J. P., Mercier, C., Duprat, F., & Guilbot, A. (1975). Lintnerized starches. Chromato-graphic and enzymatic studies of insoluble residues from acid hydrolysis of various cereal starches, particularly waxy maize starch. **Starch/Stärke**, 27, 36–45.
- Rocha, T. S., Carneiro A. P. A., & Franco, C. M. L. (2010). Effect of enzymatic hydrolysis on some physicochemical properties of root and tuber granular starches. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, 30(2), 544-55.
- Rose, A. H. (1980). **Microbial Enzymes and Bioconversions**. London: Academic Press, p. 116-123.
- Sanguanpongj, V., Chotineeranat, S., Piyachomkwan, K., Oates, C. G., Chinachoti, P., & Sriroth K. (2002). Hydration and physico-chemical properties of small-particle cassava starch. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 83, 123–132.
- Schoch, T. J. (1964). Swelling power and solubility of granular starches. Pages 106-108 In: **Methods in Carbohydrate Chemistry**. R. Whistler, R. Smith, and J. BeMiller, eds. Academic Press: New York.

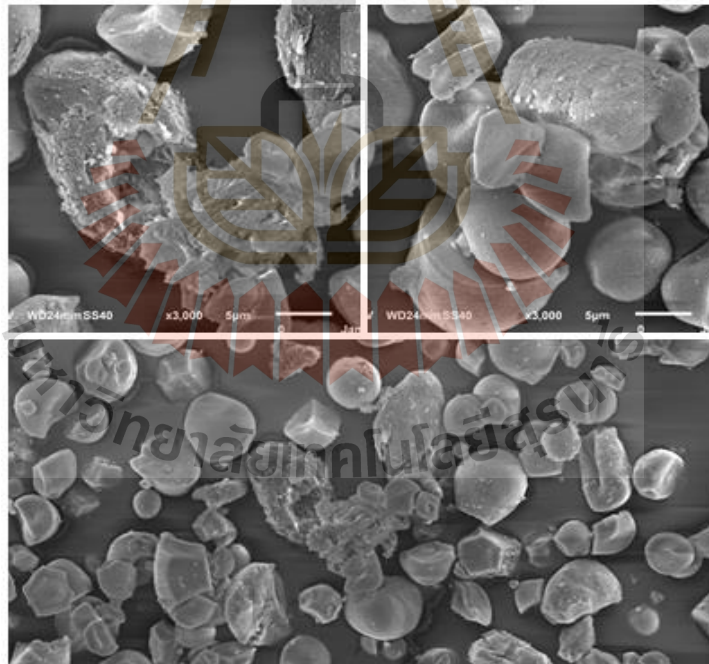
- Sinaud, S., Montaurier, C., Wils, D., Vernet, J., Brandolini, M., Bouteloup-Demange, C., & Vermorel, M. (2002). Net energy value of two low-digestible carbohydrates, Lycasin HBC and the hydrogenated polysaccharide fraction of Lycasin HBC in healthy human subjects and their impact on nutrient digestive utilization. **British Journal of Nutrition**, 87, 131–139.
- Sing K. S. (1985). Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. **Pure Applied Chemistry**, 57 (4), 603-619.
- Singh, V., & Ali, S. Z. (2000). Acid degradation of starch. The effect of acid and starch type. **Carbohydrate Polymers**, 41, 191–195
- Slavin, J., Stewart, M., Timm, D., & Hospattankar, A. (2009). Fermentation patterns and short chain-fatty acid (scfa) profiles of wheat dextrin and other functional fibers. In Proceedings of 4th international dietary fibre conference 2009 (p. 35). **International Association for Cereal Science and Technology (ICC)**, 1–3 July 2009, Vienna, Austria.
- Sujka, M., & Jamroz, J. (2006). Starch granule porosity and its changes by means of amylolysis. **International Agrophysics**, 21, 107-113.
- Tamaki, S., Teranishi, K., Hisamatsu, M., and Yamada, T. (1997). Innerstructure of potato starch granules. **Starch/Stärke**, 49, 387–390.
- Tomasik, P., Palasinski, M., & Wiejak, S. (1989). The thermal decomposition of carbohydrates. Part II. The decomposition of starch. **Advances in Carbohydrate Chemistry and Biochemistry**, 47, 270-335.
- Uthumporn, U., Zaidul, I. S. M., & Karim, A. A. (2010). Hydrolysis of granular starch at sub-gelatinization temperature using a mixture of amylolytic enzymes. **Food and Bioproducts Processing**, 88(C1), 47–54.
- Valetudie, J. C., Colonna, P., Bouchet, B., & Gallant, D. J. (1993). Hydrolysis of tropical tuber starches by bacterial and pancreatic alpha-amylases. **Starch/Stärke**, 45, 270–276.
- Vasanthan, T., & Bhatta, R. S. (1996). Physicochemical properties of small and large granule starches of waxy, regular and high amylose barleys. **Cereal Chemistry**, 73, 199–207.
- Vermeulen, R., Goderis, B., Reynaers, H., & Delcour, J. A. (2004). Amylopectin molecular structure reflected in macromolecular organization of granular starch. **Biomacromolecules**, 5, 1775–1786.

- Vermorel, M., Coudray, C., Wils, D., Sinaud, S., Tressol, J. C., & Montaurier, C. (2004). Energy value of a low-digestible carbohydrate, NUTRIOSE® FB, and its impact on magnesium, calcium and zinc apparent absorption and retention in healthy young men. **European Journal of Clinical Nutrition**, 43, 344–352.
- Wang, Y. J., Kozłowski, R., & Delgado, G. A. (2001). Enzyme resistant dextrans from high amylose corn mutant starches. **Starch/Stärke**, 53, 21-26.
- Wang, L. F., & Wang, Y. J. (2001). Structures, physicochemical properties of acid-thinned corn, potato and rice starches. **Starch/Stärke**, 53, 570–576.
- Whistler, R. L., Bemille, J. N., & Paschall, Eugene, F. (1984). Starch : Chemistry and Technology. 2nd ed. London: Academic Press, p. 162-164, 254, 292-293.
- Wurzburg, O.B. (1995). Modified starches. In Food polysaccharides and their applications (pp. 67–77). New York: Marcel Dekker.
- Yanjie, B., Cai, L., Douth, J., Gilbert, E. P., & Shi, Y. C. (2014). Structural Changes from Native Waxy Maize Starch Granules to Cold Water-Soluble Pyrodextrin during Thermal Treatment. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 62, 4186-4194.
- Youshuang, C., Shirong, H., Zhongfeng, T., Xiaowei, C., Zengfang, Z. (2011). Structural changes of cassava starch granules hydrolyzed by a mixture of α -amylase and glucoamylase, **Carbohydrate Polymers**, 85(1), 272-275.
- Zeller, B. L., Saleeb, F. Z., & Ludescher, R. D. (1999). Trends in development of porous carbohydrate food ingredients for use in flavor encapsulation. **Trends in Food Science and Technology**, 9, 389-394.
- Zhang, B., Dhital, S., & Gidley, M. J. (2013). Synergistic and antagonistic effects of α -amylase and amyloglucosidase on starch digestion. **Biomacromolecules**, 14(10), 1945-1954.

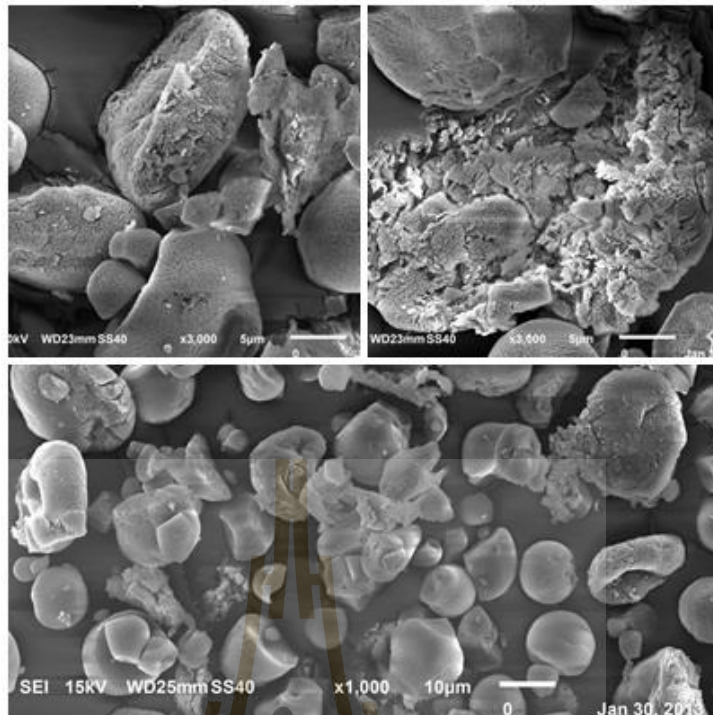




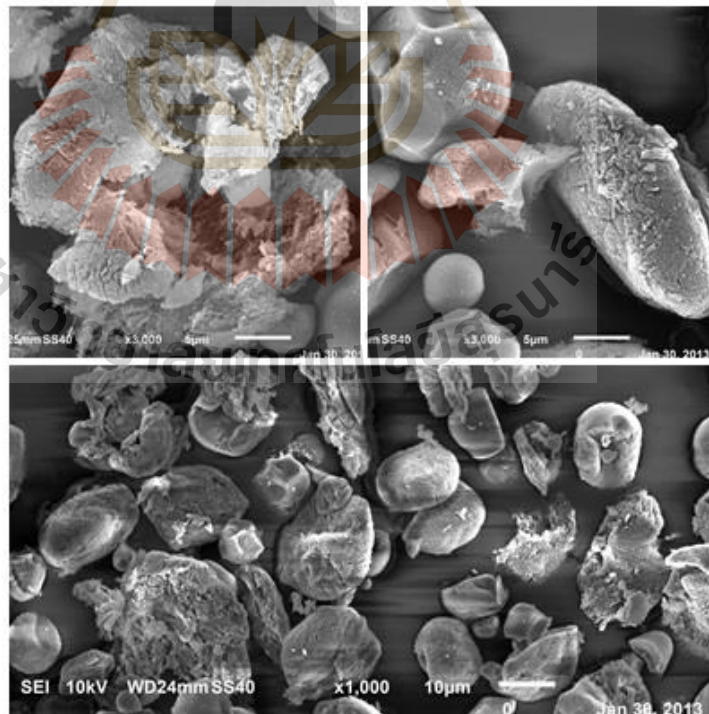
ภาพที่ ผ1 รูเดี่ยวขนาดใหญ่ นั้น ภายในมีความขรุขระ และรูที่เกิดขึ้นขยายลงไปสู่ส่วนกลางของเม็ดสตาร์ช ที่เกิดจากการย่อยด้วยเอนไซม์ผสม



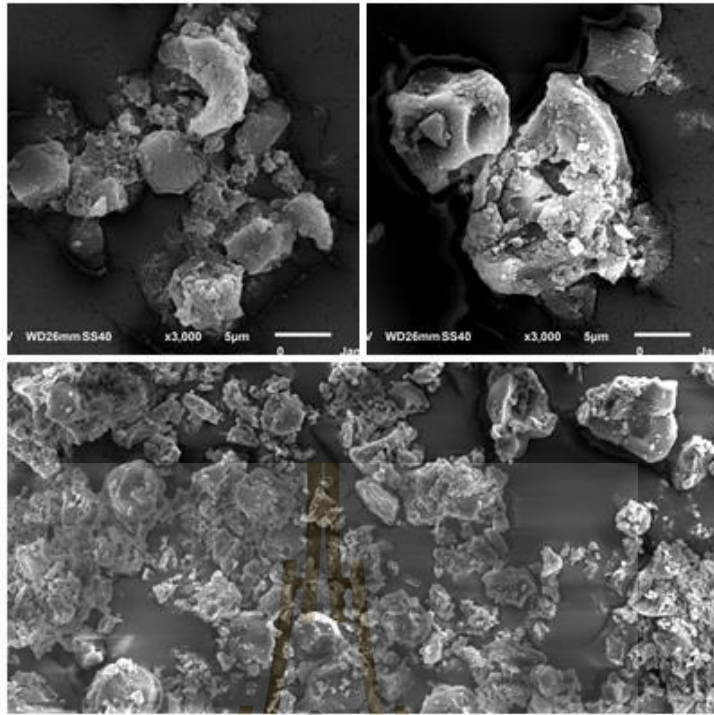
ภาพที่ ผ2 สตาร์ชมันสำปะหลังดิบบดด้วย ball mill เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



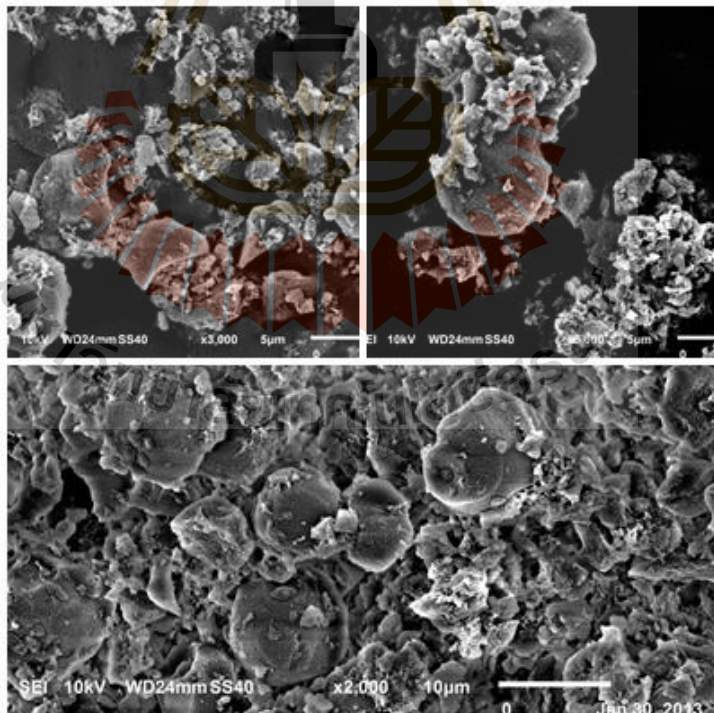
ภาพที่ ผ3 สตาร์ชมันสำปะหลังตีบดด้วย ball mill เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



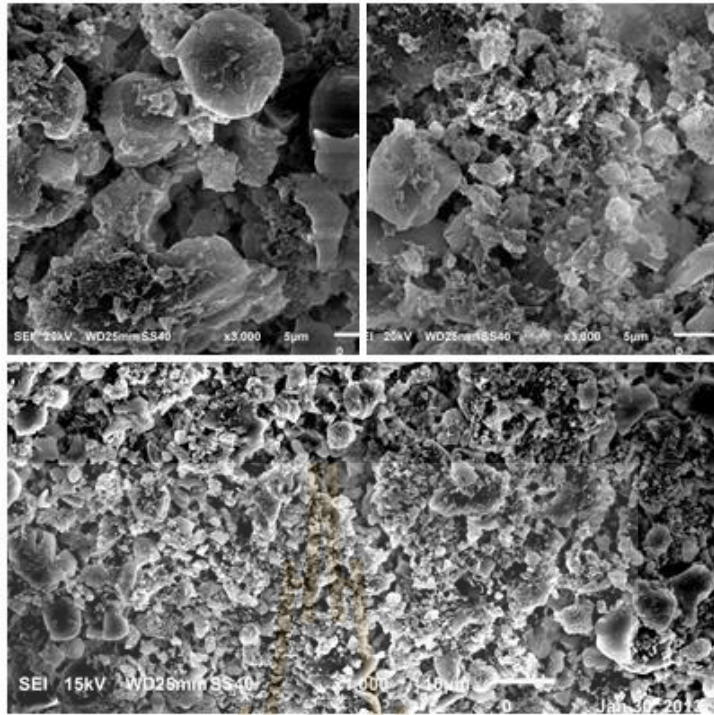
ภาพที่ ผ4 สตาร์ชมันสำปะหลังตีบดด้วย ball mill เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



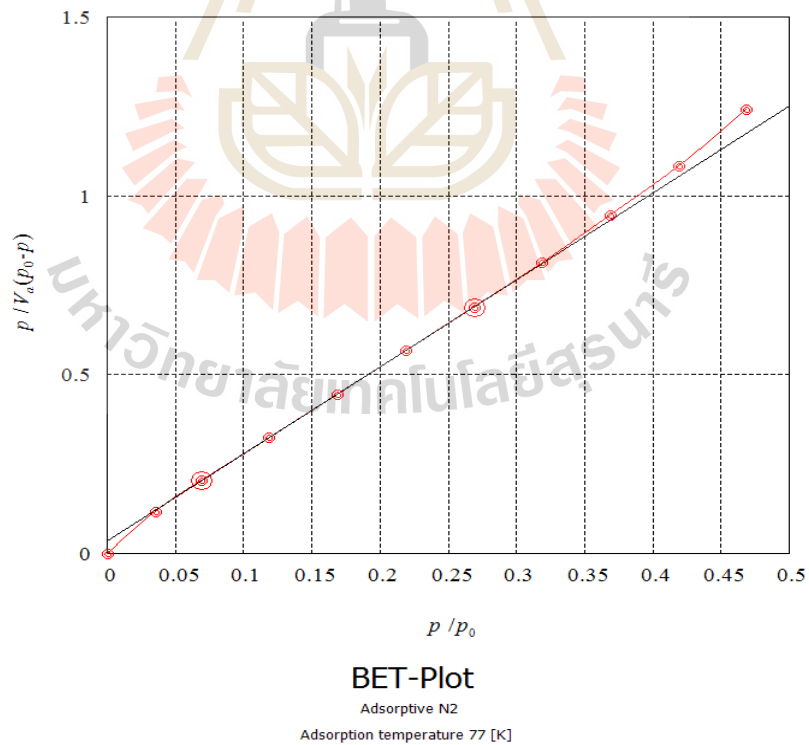
ภาพที่ ผ5 สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball mill เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



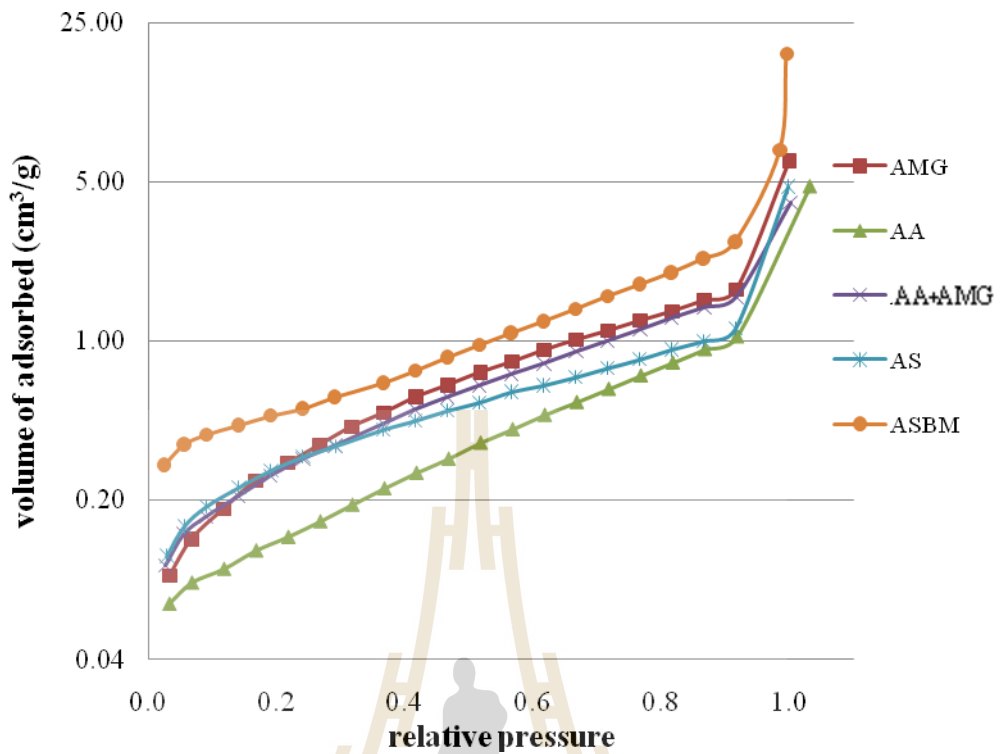
ภาพที่ ผ6 สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball mill เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ภาพที่ ๗7 สตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball mill เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



ภาพที่ ๗8 ตัวอย่างกราฟ BET สำหรับคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะ



ภาพที่ ๙ ไอโซเทอมการดูดซับไนโตรเจนของสตาร์ซึบที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (AA), สตาร์ซึบที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเตส (AMG), สตาร์ซึบที่ย่อยด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเตสร่วมกับเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (AA+AMG), สตาร์ซึบที่ย่อยด้วยกรด (AS), และ สตาร์ซึบที่ย่อยด้วยกรดแล้วบดด้วย ball mill (ASBM)

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

1. ผลงานตีพิมพ์

- Keeratiburana, T., Hansen, A. R., Soontaranon, S., Blennow, A. and **Tongta, S.** 2020. Pre-treatment of granular rice starch to enhance branching enzyme catalysis. *Carbohydrate Polymers*, 247: 116741. (IF 7.182)
- Sarifudin, A., Keeratiburana, T., Soontaranon, S., Tangsathitkulchai, C. and **Tongta, S.** 2020. Pore characteristics and structural properties of ethanol-treated starch in relation to water absorption capacity. *LWT-Food Science and Technology*, 129: July 2020: 109555. (IF 3.714) <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109555>
- Sarifudin, A., Soontaranon, S., Peerapattana, J. and **Tongta, S.** 2020. Mechanical strength, structural and hydration properties of ethanol-treated starch tablets and their impact on the release of active ingredients. *Journal of Biological Macromolecules*, 149:541-551. (IF 4.784)
- Keeratiburana, T., Hansen, A. R., Soontaranon, S., **Tongta, S.** and Blennow, A. 2020. Porous rice starch produced by combined ultrasound-assisted ice recrystallization and enzymatic hydrolysis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 145:100-107. (IF 4.784)
- Keeratiburana, T., Hansen, A. R., Soontaranon, S., Blennow, A. and **Tongta, S.** 2020. Porous high amylose rice starch modified by amyloglucosidase and maltogenic α -amylase. *Carbohydrate Polymers*, 230: 15 February 2020: 115611. (IF 6.044)

- Prompiputtanapon, K., Sorndech, W. and **Tongta, S.** 2020. Surface Modification of Tapioca Starch by Using the Chemical and Enzymatic Method. *Starch/Stärke*, 72 (3-4): 1-6. doi: 10.1002/star.201900133. (IF 1.795)
- Na-Nakorn, K., Kulrattanak, T., Hamaker, B. R. and **Tongta, S.** 2019. Starch digestion kinetics of extruded reformed rice is changed in different ways with added protein or fiber. *Food & Function*, 10: 4577-4583. (IF 3.241)
- Sarifudin, A., Soontaranon, S., Rugmai, S. and **Tongta, S.** 2019. Structural transformations at different organizational levels of ethanol-treated starch during heating. *International Journal of Biological Macromolecules*, 132:1131-1139. (IF 4.784)
- Sorndech, W., Rodtong, S., Blennow, A. and **Tongta, S.** 2019. Impact of resistant maltodextrins and resistant starch on human gut microbiota and organic acids production. *Starch/Stärke*, 71:1-8. doi: 10.1002/star.201800231. (IF 1.795)
- Boonna, S., Rolland-Sabatéb, A., Lourdin, D. and **Tongta, S.** 2019. Macromolecular characteristics and fine structure of amyloamylase-treated cassava starch. *Carbohydrate Polymers*, 204: 143-150. (IF 6.044)
- Waraporn, S., Na Nakorn, K., **Tongta, S.**, and Blennow, A. 2018. Isomalto-oligosaccharides: Recent insights in production technology and their use for food and medical applications. *LWT-Food Science and Technology*, 95:135-142. (IF 3.714)
- Boonna, S. and Tongta, S. 2018. Structural transformation of crystallized debranched cassava starch during dual hydrothermal treatment in relation to enzyme digestibility. *Carbohydrate Polymers*, 191: 1-7. (IF 6.044)
- Yuwang, P., Sulaeva, I., Hell, J., Henniges, U., Böhmendorfer, S., Rosenau, T., Chitsomboon, B. and **Tongta, S.** 2018. Phenolic compounds and antioxidant properties of arabinoxylan hydrolysates from defatted rice bran. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98:140-146. (IF 2.422)
- Sorndech, W., **Tongta, S.**, and Blennow, A. 2018. Slowly digestible- and non-Digestible α -glucans: An enzymatic approach to starch modification and nutritional effects. *Starch/Stärke*, 70 (9-10): 1-11.

- Sorndech, W., Sagnelli, D., Blennow, A., and **Tongta, S.** 2017. Combination of amylase and transferase catalysis to improve IMO compositions and productivity. *LWT-Food Science and Technology*, 79:479-486. (IF 3.714)
- Sorndech, W., Sagnelli, D., Meier, S., Jansson, A.M., Lee, B-H., Hamaker, B.R., Rolland-Sabaté, A., Hebelstrup, K.H., **Tongta, S.**, and Blennow, A. 2016. Structure of branching enzyme- and amyloamylase modified starch produced from well-defined amylose to amylopectin substrates. *Carbohydrate Polymers*, 152: 51-61. (IF 6.044)
- Kiatponglarpa, W., Rugmai, S., Rolland-Sabatéb, A., Buléon, A., and **Tongta, S.** 2016. Spherulitic self-assembly of debranched starch from aqueous solution and its effect on enzyme digestibility. *Food Hydrocolloids*, 55:235-243. (IF 5.839)
- Sorndech, W., Meier, S., Jansson, A. M., Sagnelli, D., Hindsgaul, O., **Tongta, S.**, and Blennow, A. 2015. Synergistic Amylomaltase and Branching Enzyme Catalysis to Suppress Cassava Starch Digestibility. *Carbohydrate Polymers*, 132:409-418. (IF 6.044)
- Prompiputtanapon, K. and **Tongta, S.** 2015. Modification of tapioca starch granule surfaces on soluble fiber formation. *Journal of Food Science and Agricultural Technology*. 1(1): 116-121.
- Tananchai, C., **Tongta, S.** and Rodtong, S. 2015. Evaluation of different resistant starch types for stimulating growth of the dominant lactic acid bacteria inhabiting human colon. *Journal of Food Science and Agricultural Technology*. 1(1): 197-200.
- Kiatponglarp, W., **Tongta, S.**, Rolland-Sabatéb, A., and Buléon, A. 2015. Crystallization and chain reorganization of debranched rice starches in relation to resistant starch formation. *Carbohydrate Polymers*. 122:108-144. (IF 6.044)
- Chaisirichoenkul, J., **Tongta S.** and Intarapichet, K. 2011. Structure and chemical and physicochemical properties of Job's tear (*Coix lacryma-jobi* L.) kernels and flours. *Suranaree J. Sci. Technol.* 18(2):109-122.
- Boonna, S., **Tongta, S.** and Piyachomkwan, K. 2010. Effect of dehydration methods on digested starch fractions of retrograded debranched rice starch. *Suranaree J. Sci. Technol.* 17(4):359-368.

- Apirattananusorn, S., **Tongta, S.**, Cui, S.W., and Wang, Q. 2008. Chemical, molecular, and structural characterization of alkali extractable polysaccharides from Job's Tears. *J. Agric. Food. Chem.* 56:8549-8557. (IF 3.571)
- Rareunrom, K., **Tongta, S.** and Yongsawatdigul, J. 2008. Effect of soy protein isolate on chemical and physical characteristics of meat analog. *Asian Journal of Food and Agro-Industry*, 1(02):97-104.
- Phoungchandand, S., Bhulaidok, S., Nantachai, K., Woraphuttaporn, W., **Tongta, S.** and Suvannason, V. 2007. Influence of various cereal flours on physical properties of expanded extrudates. *Khon Kaen University Research Journal*. 12(4):431-441.
- Kiatpongarp, W. and **Tongta, S.** 2007. Structural and Physical Properties of Debranched Tapioca Starch. *Suranaree Journal of Science and Technology*, 14(2):195-204.
- Rareunrom, K., **Tongta, S.** and Yongsawatdigul. 2007. Effect of full fat soy flour on characteristics of soy protein meat analog. *Suranaree Journal of Science and Technology*, 14(2):185-193.
- Pakdeechanuan, P., Intarapichet, K. and **Tongta, S.** 2007. Effect of extrusion parameters on conjugated linoleic acids of corn extrudate. *J. Agric. Food. Chem.*, 55: 1463-1468. (IF 3.571)
- 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 Applications' Tomasik, P., Yuryev, V.P. and Bertoft, E. (eds.). pp. 357-364. Drukarnia GS, Cracow.
- Sottirattanapan, P. and **Tongta, S.** 2003. Effect of extrusion parameters on physical characteristics of rice extrudate. *Suranaree Journal of Science and Technology*. 10(3):220-229.
- Nantachai, K. Srijesdaruk,V., **Wiriyapirom,S.** and Tungwongchai, R. 1997. Sensory perceptions of sugarcanes juices. *Khon Kaen University Research Journal*. 2(1):10-17.

2. ทรรศนทางปัญญา

1. อนุสิทธิบัตร ชื่อ กระบวนการผลิตแป้งที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำและทนต่อสภาวะการหุงต้มและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกรรมวิธีดังกล่าว เลขที่คำขอ 15033001693 ยื่นจดปี พ.ศ. 2558 ประเทศไทย

2. อนุสิทธิบัตร ชื่อ กระบวนการผลิตแป้งต้านทานชนิด 4 เลขที่อนุสิทธิบัตร 1303006876 วันออกอนุสิทธิบัตร 20 มกราคม 2559 ยื่นจดปี พ.ศ. 2558 ประเทศไทย

3. อนุสิทธิบัตร ชื่อ กระบวนการผลิตแป้งสตาร์ชข้าวที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ชนิด 3 เลขที่อนุสิทธิบัตร 1303000062 วันออกอนุสิทธิบัตร 3 สิงหาคม 2558 ยื่นจดปี พ.ศ. 2556 ประเทศไทย

3. การประชุมระดับนานาชาติ

Sarifudin, A., Soontaranon, S., Rugmai, S., & Tongta, S. 2019. Alterations on the structural and morphological properties of ethanol-treated starch before and after hydration. The 21st Food Innovation ASIA Conference. June 13-15, 2019. Bangkok, Thailand.

Sarifudin, A., Soontaranon, S., Rugmai, S., & Tongta, S. 2018. Effect of storage humidity on the structural, morphological properties and water adsorption capacity of ethanol-treated starch. The 4th International Symposium on Applied Chemistry (ISAC) 2018. November 1-2, 2018. Bumi Serpong Damai (BSD) City, Tangerang, Indonesia.

Boonna, S., Rolland-Sabaté, A., Lourdin, D. and **Tongta, S.** 2018. Crystallization of debranched amyloamylase-treated cassava starches in relation to thermal stability and enzyme digestibility. Starch Round Table EU (SRTEU) 2018. October 18-19, 2018. Norwich, United Kingdom.

Boonna, S., Rolland-Sabaté, A., Lourdin, D. and **Tongta, S.** 2018. Macromolecular characteristics and fine structure of amyloamylase-treated cassava starch. 2018 AACC International's Annual Meeting (Cereals & Grains 18). October 21-23, 2018. London, United Kingdom.

Nontamas, P. and **Tongta, S.** 2017. Effect of conditioning time and starch granule surface modification on starch citrate formation. Starch Update 2017: The 9th International Conference on Starch Technology. February 27-28, 2017. Bangkok, Thailand.

Boonna, S., Lourdin, D and Tongta, S. Enzymatic Modification and Hydrothermal Treatments on Starch Digestibility of Cassava Starch. EU-Starch Round Table 2016. November 17-18, 2016. Lille, France.

W. Sorndech, D. Sagnelli, S. Meier, A. M. Jansson, B. H. Lee, B. R. Hamaker, A. Rolland-Sabaté, K. H. Hebelstrup, **S. Tongta** and A. Blennow. 2016. Effect of Amylose Content on Branching Enzyme and Amyloamylase Chain Transfer. 2016 IFT Annual Meeting, July 17-19, 2016. Chicago, USA.

- Nontamas, P. and **Tongta, S.** 2015. Resistant starch and properties of the native and cross-linked starch exposed to electron beam irradiation. In Proceeding of Starch Update 2015: The 8th International Conference on Starch Technology, p.147-151. December 3-4, 2015. Bangkok, Thailand.
- Sorndech, W., Meier, S., Hebelstrup, K. H., **Tongta, S.** & Blennow, A. 2015. Effect of amylose content on amylomaltase and branching enzyme catalysis to produce soluble indigested α -glucan fraction. In Proceeding of Starch Update 2015: The 8th International Conference on Starch Technology, p.71-76. December 3-4, 2015. Bangkok, Thailand.
- Sorndech, W., Meier, S., Hebelstrup, K. H., Tongta, S. & Blennow, A. (2015). Correlation between starch modified by enzymes and soluble-, slowly- and indigested α -glucan formation. The 41st Congress on Science and Technology of Thailand, November 6-8, 2015, Nakhon Ratchasima, Thailand.
- Boonna, S. and **Tongta, S.** 2015. Improvement of resistant starch content and cooking stability of debranched cassava starch by hydrothermal treatment. AACC International Centennial Meeting. October 18-21, 2015. Minneapolis, Minnesota, U.S.A.
- Kiatpongarp, W., Rugmai, S., Buléon, A, and **Tongta, S.** 2015. Crystallization behaviour of debranched rice starches monitored by time-resolved synchrotron wide-angle X-ray scattering. AACC International Centennial Meeting. October 18-21, 2015. Minneapolis, Minnesota, U.S.A.
- Promptiputtanapon, K., and **Tongta, S.** 2014. Modification of tapioca starch granule surface on soluble fiber formation. The 2nd International Conference on Agricultural and Agro-Industry. November 20-21, 2014. Mae Fah Luang University, Chiang Rai, Thailand.
- Tananchai, C., **Tongta, S.**, and Rodtong, S. 2014. Evaluation of different resistant starch types for stimulating growth of the dominant lactic acid bacteria inhabiting human colon. The 2nd International Conference on Agricultural and Agro-Industry. November 20-21, 2014. Mae Fah Luang University, Chiang Rai, Thailand.
- Kiatpongarp, W., **Tongta, S.**, and Buleon, A. 2013. Resistant starch formation of rice from different varieties. The 5th ASIAHORCs Joint Symposium. November 26-28, 2013. Nusa Dua, Bali, Indonesia

- Kiatpongarp, W., **Tongta, S.**, and Buleon, A. 2013. Formation of spherulites from debranched rice starches and their digestibility. In Proceeding of Starch Update 2013: The 7th International Conference on Starch Technology, p 182-187. November 21-22, 2012. Bangkok, Thailand.
- Jampatesh, S, and **Tongta, S.** 2013. Impacts of Heating Processes on Physical Properties of Resistant Citrate Rice Starch. In Proceeding of Starch Update 2013: The 7th International Conference on Starch Technology, p.219-226. November 21-22, 2012. Bangkok, Thailand.
- Thanompolkrung, T., Tongta, S. and Yongsawatdigul, J. Effect of sodium sulfite on pasting and textural properties of aged rice. AACC International Meeting, September 29-October 2, 2013. Albuquerque, New Mexico U.S.A.
- Kiatpongarp, W., **Tongta, S.** and Buléon, A. 2012. Crystallization behavior of debranched waxy rice starch in relation to enzyme digestibility, thermal properties and microstructure. XIX International Starch Convention. September 18-20, 2012. Moscow, Russia.
- Kiatpongarp, W., **Tongta, S.**, Rugmai, S., and Soontaranon, S. 2012. Preliminary study of starch granular structure using synchrotron radiation WAXS and SAXS techniques. AOFSSR 2012, the 6th Asia Oceania Forum for Synchrotron Radiation Research. August, 8-12, 2012. Bangkok, Thailand
- Yuwang, P. and **Tongta, S.** 2012. Enzymatic extraction of rice bran arabinoxylans and antioxidant property. Plant and Seaweed Polysaccharides workshop. July 17-20, 2012. Nantes, France.
- Tongta, S.** and Boohna, S. 2012. Effect of resistant rice starch supplementation on characteristics of rice noodle. Plant and Seaweed Polysaccharides workshop. July 17-20, 2012. Nantes, France.
- Lapkhoksung, A. and **Tongta, S.** and Piyachomkwan, K. 2012. Effects of pullulanase and isoamylase and rice varieties on resistant starch type III formation. In Proceeding of Starch Update 2011: The 6th International Conference on Starch Technology, p 90-95. February 13-14, 2012. Bangkok, Thailand.
- Charoenporn, S. and **Tongta, S.** 2012. Physicochemical and rheological properties of extruded high amylose rice flour. In Proceeding of Starch Update 2011: The 6th International Conference on Starch Technology, p 244-249. February 13-14, 2012. Bangkok, Thailand.

- Kiatpongarp, W. and **Tongta, S.** 2012. Formation of resistant starch type II and type III with hydrolysis of alpha-amylase. In Proceeding of Starch Update 2011: The 6th International Conference on Starch Technology, p 340-345. February 13-14, 2012. Bangkok, Thailand.
- Tongta, S.**, Boonna, S., Kitiratanakornkul, C. and Nular, T. 2012. Dough and bread characteristics with supplementation of resistant rice starch. In Proceeding of Starch Update 2011: The 6th International Conference on Starch Technology, p 346-351. February 13-14, 2012. Bangkok, Thailand.
- Tongta, S.** and Boonna, S. 2011. Characteristics of rice-based extruded snack with resistant starch supplementation. Poster presentation in IFT Annual Meeting, June 11-14, 2011, New Orleans, LA USA.
- Tongta, S.** and Kiatpongarp, W. 2010. Effect of acid dextrinization and annealing on resistant starch type III formation. Oral presentation XVIII International Starch Convention. June 21-25, 2010. Cracow, Poland.
- Thanompolkrung, T., **Tongta, S.** and Yongsawatdigul, J. 2010. Conformational changes of rice proteins affecting on pasting and textural properties of rice. Poster presentation in Food Innovation Asia Conference 2010. June 17-18, 2010. BITEC, Bangkok, Thailand.
- Chaisiricharoenkul, J. and **Tongta, S.** 2009. Effect of extrusion parameters on starch digestion and physicochemical properties of Job's Tear (*Coix lacryma jobi* L.) flour. In Proceeding of Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.
- Dalai, N. and **Tongta, S.** 2009. Physicochemical properties of waxy and high amylose rice flour during storage. In Proceeding of Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.
- Kiatpongarp, W. and **Tongta, S.** 2009. Comparative effect of different temperature cycling on resistant starch formation. In Proceeding of Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.
- Tongta, S.** and Boonna, S. 2009. Physical modification of rice flour by extrusion. In Proceeding of Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.

- Tongta, S.** and Kiatpongarp, W. 2009. Impact of enzyme concentration and hydrolysis time on resistant starch formation. In Proceeding of Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.
- Dalai, N. and **Tongta, S.** 2009. Physicochemical and textural properties of high amylose rice during storage In Proceeding of Food Innovation Asia Conference 2009. June 18-19, 2009. BITEC, Bangkok, Thailand.
- Boonna, S., **Tongta, S.** and Piyachomkwan, K. 2009. Effect of aging condition on resistant starch formation of rice starch. Poster presentation in 2009 IFT Annual Meeting. June 6-9, 2009. Anaheim, CA, USA.
- Dalai, N. and **Tongta, S.** 2008. Comparative study on physical properties of waxy and non-waxy rice during storage. . In Proceeding of The 34th Congress on Science and Technology of Thailand. October 31-November 2, 2008. Bangkok, Thailand.
- Boonna, S. and **Tongta, S.** 2008. Effect of starch content and aging temperature on slowly digestible starch and resistant starch formation in debranched rice starch. . In Proceeding of The 34th Congress on Science and Technology of Thailand. October 31-November 2, 2008. Bangkok, Thailand.
- Boonna, S. and **Tongta, S.** 2007. Effect of drum drying parameters on physical properties of pregelatinized rice flour. In Proceeding of Starch Update 2007: The 4th International Conference on Starch Technology. November 6-7, 2007. Bangkok, Thailand.
- Kiatpongarp, W. and **Tongta, S.** 2007. Structural and physical properties of enzyme-resistant starch produced from debranched and retrogradation of cassava starch. In Proceeding of Starch Update 2007: The 4th International Conference on Starch Technology. November 6-7, 2007. Bangkok, Thailand.
- Siriboon, B. and **Tongta, S.** 2007. Effect of annealing on physicochemical properties of waxy and normal rice starches. In Proceeding of Starch Update 2007: The 4th International Conference on Starch Technology. November 6-7, 2007. Bangkok, Thailand.
- Chaisiricharoenkul, J. and **Tongta, S.** 2007. Physicochemical and antioxidant properties of Job's Tear Flour. In Proceeding of The 9th Agro-Industrial Conference, Food Innovation Asia 2007. June 14-15, 2007. Bangkok, Thailand.

- Rareunrom, K., **Tongta, S.** and Yongsawatdigul, J. 2007. Effect of soy protein isolate on chemical and physical characteristics of meat analog. In Proceeding of The 9th Agro-Industrial Conference, Food Innovation Asia 2007. June 14-15, 2007. Bangkok, Thailand.
- Siriboon, B. and **Tongta, S.** 2007. Effect of Annealing on Physicochemical Properties of Waxy Rice. In Proceeding of The 9th Agro-Industrial Conference, Food Innovation Asia 2007. June 14-15, 2007. Bangkok, Thailand.
- Apirattananusorn, S., Cui, S.W., Wang, Q. and **Tongta, S.** 2006. Extraction and composition of water-unextractable arabinoxylans from Job's tears (*Coix lacryma-jobi* L.) (Abstract. pp. 238 and Poster presentation). 2006 CIFST/AAFC Joint Conference, May 28-30, 2006. Montreal, Canada.
- Kiatpongarp, W. and **Tongta, S.** 2006. Effect of debranching on enzyme resistant starch formation in tapioca starch. In Proceeding of The 8th Agro-Industrial Conference. June 15-16, 2006. Bangkok, Thailand.
- Tongta, S.**, Ningsanond, S. and Boonna, S. 2006. Influence of hydrocolloids and soy milk solid on physical and textural qualities of soy yoghurt. In Proceeding of The 8th Agro-Industrial Conference. June 15-16, 2006. Bangkok, Thailand.
- Rareunrom, K., **Tongta, S.** and Yongsawatdigul. 2004. Structure and texture characteristic of soy protein meat analog. In Proceeding of The 6th Agro-Industrial Conference. May 28-29, 2004. Bangkok, Thailand.
- Wiryapirom,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
- Wiryapirom,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