บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

กล้วยเป็นผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจทั้งในระดับท้องถิ่นและระดับประเทศของไทย เป็นพืชที่ปลูกง่าย โตเร็ว ดูแลรักษาง่าย ทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ ไม่ต้องใช้สารเคมีในการเจริญเติบโต ทั้งยังมีผลตลอดทั้งปี และสามารถปลูกได้ดีในทุกภาคของประเทศไทย สำหรับทางภาคใต้ของประเทศไทยพบว่าสามารถปลูกกล้วยได้หลากหลายพันธุ์ แต่พันธุ์ที่เป็นผลผลิตที่สำคัญในท้องถิ่นภาคใต้ ได้แก่ กล้วยนางพญา[Musa *sp.* (AAB group)] และกล้วยหิน [Musa *sp.* (BBB group)] ซึ่งเป็นกล้วยพันธุ์พื้นเมืองที่มีการปลูกมากในเขต 4 จังหวัดชายแดนภาคใต้ (จังหวัดยะลา ปัตตานี นราธิวาส และสงขลา) เป็นพืชที่ไม่พบรายการดัชนีปลูกแซมยางพาราหรือสวนผลไม้อื่นๆ และเป็นพืชที่ให้ผลผลิตได้ตลอดปี จึงทำให้ง่ายต่อการส่งเสริมการปลูกหากต้องการผลผลิตเพิ่ม โดยทั่วไปนิยมนำมารับประทานสดหรือทำเป็นขนมหวานต่าง ๆ ในบางฤดูกาลผลผลิตของกล้วยจะมีมากกว่าการบริโภค ทำให้บริโภคไม่ทันและราคาตก เป็นผลให้ใช้ประโยชน์จากกล้วยได้น้อยลง การแปรรูปกล้วยจึงเป็นแนวทางที่สามารถแก้ปัญหาผลิตผลมากเกินไป สตาร์ชกล้วยเป็นหนึ่งในวิธีการแปรรูปกล้วยดิบเนื่องจากขณะที่เป็นกล้วยดิบจะมีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบอยู่มากกว่า 70% (น้ำหนักแห้ง) (Waliszewski, 2003) ซึ่งสามารถใช้ทำผลิตภัณฑ์ได้มากชนิดและเป็นการเพิ่มมูลค่าวัตถุดิบและเป็นแนวทางการนำสตาร์ชกล้วยไปทดแทนสตาร์ชชนิดอื่นทีมีราคาแพง เช่นมันฝรั่ง หรือข้าวโพด เป็นต้น สตาร์ชกล้วยมีสรรพคุณเป็นยารักษาโรคกระเพาะและลำไส้ และยังใช้ทำยารักษาโรคต่าง ๆ อีกมากมาย และนอกจากนั้นพบว่าสตาร์ชกล้วยมีสมบัติเป็นสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอ็นไซม์แบบที่ 2 (Resistance starch type 2) ซึ่งไม่สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์ในลำไส้เล็กของมนุษย์ มีสมบัติเทียบเท่ากับใยอาหาร ซึ่งมีประโยชน์ต่อระบบขับถ่าย สามารถช่วยป้องกันกระเพาะว่าง และลดเวลาในการเคลื่อนผ่านของอาหารไปยังส่วนที่ย่อย ทำให้รู้สึกอิ่ม นอกจากนี้สตาร์ชยังมีสมบัติที่เด่นกว่าเส้นใยอาหาร คือมีสมบัติบางประการที่เหมาะสมต่อการแปรรูป สามารถช่วยควบคุมลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีและกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์และมีความทนทานระหว่างการแปรรูป จึงสามารถนำสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง ทำให้สามารถเพิ่มความหลากหลายของผลิตภัณฑ์อาหารเสริมเพื่อสุขภาพได้มากขึ้น (Ranhotra *et al.*, 1996)

จากข้อมูลข้างต้นพบว่าสตาร์ชกล้วยมีคุณสมบัติที่พิเศษเฉพาะตัว และมีคุณค่าทางอาหารซึ่งมีประโยชน์ต่อร่างกาย ดังนั้นจึงมีความน่าสนใจที่จะนำกล้วยโดยเฉพาะกล้วยพันธุ์พื้นเมืองที่มีศักยภาพในการปลูกทางภาคใต้ไปผลิตเป็นสตาร์ชเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหาร และอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ แต่เนื่องจากสตาร์ชดิบโดยทั่วไปมีสมบัติบางประการที่ไม่เหมาะสมกับการผลิตในอุตสาหกรรม ได้แก่ ไม่สามารถละลายได้ที่อุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันสูง ไม่มีความคงทนต่อความร้อน กรด และแรงเฉือนในกระบวนการผลิต ไม่มีความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลาย และมีความหนืดต่ำ ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำ และสิ้นเปลืองงบประมาณการผลิตโดยไม่จำเป็น (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2546) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการดัดแปรสมบัติบางประการของสตาร์ชกล้วยด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมีเพื่อให้เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ผลิตจากโดแช่เยือกแข็ง และช่วยเสริมความแข็งแรงของฟิลม์ที่ผลิตจากสตาร์ชข้าว ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่มจากสตาร์ชกล้วยอย่างมีระบบและมีประสิทธิภาพต่อไป อีกทั้งยังเป็นการดำเนินงานตามนโยบายเศรษฐกิจแบบพอเพียงในการใช้ประโยชน์จากวัตถุดิบที่มีในท้องถิ่นให้มีมูลค่าเพิ่ม เพื่อจะช่วยให้เกษตรกรในท้องถิ่นมีรายได้เพิ่มมากขึ้น และนอกจากนั้นงานวิจัยนี้ยังจะสามารถใช้เป็นแนวทางในการวิจัยและพัฒนาการใช้ประโยชน์จากผลิตผลประเภทกล้วยสายพันธุ์อื่น ๆ ได้อีกด้วย

ตรวจเอกสาร

1. กล้วย

กล้วยที่มีปลูกกันอยู่ในปัจจุบัน มีถิ่นกำเนิดอยู่ทางเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งประเทศไทยอยู่ในเขตพื้นที่ที่เหมาะแก่การเพาะปลูกกล้วย และให้ผลผลิตมากในแถบเอเชีย โดยทุกภาคของประเทศไทยสามารถปลูกกล้วยได้ แม้ว่าประวัติความเป็นมาของกล้วยจะไม่แพร่หลายมากนักในสมัยนั้น แต่ก็เป็นที่รู้จักกันว่ากล้วยเป็นผลไม้ชนิดแรกที่คนปลูกเพื่อเป็นอาหาร ประชาชนในแถบนี้ได้ใช้ประโยชน์ของกล้วยมาเป็นเวลานาน ใบของกล้วยนำเอามาใช้ห่อหรือสกัดเอาเส้นใยที่เป็นประโยชน์ และผลของกล้วยที่นำมารับประทาน เป็นพันธุ์ที่เกิดขึ้นจากการกลายพันธุ์มาจากกล้วยป่าซึ่งมีรสหวาน ต่อมาได้มีการคัดเลือกและปรับปรุงให้ได้พันธุ์ที่ดีขึ้นเรื่อยๆ โดยใช้หน่อในการขยายพันธุ์สืบต่อกันมา

1.1 สายพันธุ์กล้วย

กล้วยเป็นไม้ล้มลุกขนาดใหญ่มีอายุหลายปี อยู่ในตระกูล Musaceae เมื่อโตเต็มที่อาจจะมีความสูง 2-9 เมตร ลำต้นที่แท้จริงของกล้วยเกิดเป็นเหง้าอยู่ใต้ดิน ส่วนลำต้นที่มองเห็นเป็นลำต้นเทียม ประกอบไปด้วยกาบใบที่อัดกันแน่น ทางพุ่มส่วนบนของลำต้นประกอบด้วยใบและช่อดอกที่เกิดมาจากจุดเจริญของเหง้า ภายในลำต้นเทียมจะมีท่อลำเลียงน้ำเต็มไปด้วยน้ำยางตลอดทุกส่วนของลำต้น ยางมีลักษณะเป็นกรดอ่อนและมีรสฝาด

กล้วยที่ปลูกกันมากอยู่ในวงศ์ Musaceae แบ่งออกเป็น 2 สกุลตามลักษณะการแตกกอ คือ *Musa* (กล้วยแตกกอ) ได้แก่กล้วยที่มีการปลูกอยู่ทั่วๆไปในปัจจุบัน มีการแตกกอหรือแตกหน่อ ผลสามารถนำมาใช้เป็นอาหารและรับประทานได้ และ *Ensete* (กล้วยไม่แตกกอ) จะขึ้นเป็นลำต้นเดี่ยวๆ มีอายุประมาณ 2 ปี หรือมากกว่า ผลรับประทานไม่ได้ เมื่อให้เมล็ดแล้วต้นจะตายไป ใช้ทำแป้งหรือเอาเส้นใย โดย Musa เป็นสกุลที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ

กล้วยมีอยู่หลายชนิด จึงมีชื่อเรียกกันมากมาย อย่างไรก็ตาม นักวิทยาศาสตร์ได้แบ่งกลุ่มกล้วยไว้เป็น 5 กลุ่มใหญ่ ดังนี้

1.) กล้วยป่าออร์นาตา (wild ornate: Musa ornata) กล้วยป่าในกลุ่มนี้ปลูกกันในประเทศไทยแถบทางเหนือ ซึ่งนิยมเรียกว่ากล้วยบัว หรืออาจเรียกชื่อพ้องว่า กล้วยป่า

2.) กล้วยป่าอะคิวมินาตา (wild acuminata: Musa acuminata) กล้วยป่าในกลุ่มนี้มีอยู่ด้วยกัน 5 ชนิด ได้แก่ malaccencis microcarpa seamea banksii และ burmanica มีอยู่แพร่หลายในประเทศไทย อาจเรียกชื่อพ้องว่า กล้วยทอง (สงขลา) กล้วยแข (แพร่ อุตรดิตถ์ และลำปาง)

3.) กล้วยป่าบาลบิเซียนา (wild balbisiana : Musa balbis) กล้วยป่าในกลุ่มนี้นิยมเรียกชื่อว่ากล้วยตานี หรืออาจเรียกชื่อพ้องว่า กล้วยพองลา (นครศรีธรรมราช) กล้วยป่า (แพร่ ,ลำปาง) มีอยู่แพร่หลายทั่วประเทศไทย

4.) กล้วยในสายพันธุ์อะคิวมินาตา (acuminate cultivars) กล้วยที่อยู่ในกลุ่มนี้มีหลายพันธุ์ได้แก่ กล้วยเล็บมือนาง กล้วยไข่ กล้วยหอม

5.) กล้วยลูกผสมอะคิวมินาตากับบาลบิเซียนา (acuminate balbisiana) พันธุ์กล้วยในกลุ่มนี้ได้แก่ กล้วยลังกา กล้วยหักมุก กล้วยน้ำว้า กล้วยนางพญา

กล้วยที่ปลูกรับประทานผลมี 2 ประเภท คือ กล้วยที่รับประทานผลสดเมื่อสุก กล้วยชนิดนี้รสหอมหวาน เรียกว่า banana บางทีเรียก sweet banana หรือ dessert banana หรือ table banana เช่น กล้วยน้ำว้า กล้วยหอม และอีกประเภทเป็นกล้วยที่รับประทานผลสุกหลังจากที่นำไปต้มหรือเผาไฟเสียก่อน กล้วยชนิดนี้ผลสดเมื่อสุกจะกระด้าง รสค่อนข้างจืด ไม่หวาน รับประทานไม่อร่อย เรียกว่า plantain หรือ cooking banana เช่นกล้วยหักมุก กล้วยกล้าย (โชติ สุวัตถิ, 2505)

กล้วยนางพญามีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า [*Musa* (AAB Group) 'Kluai Nang Paya'] เป็นกล้วยพันธุ์พื้นเมืองที่มีการปลูกมากในเขต 4 จังหวัดชายแดนภาคใต้ (จังหวัดยะลา ปัตตานี นราธิวาส และสงขลา) โดยพบได้มากที่จังหวัดสงขลา มีลักษณะทั่วไปคือ ลำต้นเทียมสูงประมาณ 2.5-3.5 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 15 เซนติเมตร ลำต้นมีสีเขียวประดำปานกลาง กาบลำต้นด้านในมีสีขาวปนชมพู ก้านใบสีเขียวปนชมพู มีปีก เส้นกลางใบสีเขียว เครือออกทางด้านข้างขนานกับพื้นดิน ก้านเครือไม่มีขน ดอกตัวผู้ห้อยลง ใบประดับรูปไข่ค่อนข้างป้อม ปลายแหลม ใบประดับม้วนขึ้น ใบประดับมีสีม่วงเข้มอมเทา ด้านในสีแดง เครือหนึ่งมีประมาณ 7-8 หวี หนึ่งหวีมีประมาณ 12-14 ผล ผลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3.5 เซนติเมตร ผลสุกสีเหลืองอมส้ม เนื้อสีเหลืองอมส้ม เนื้อแน่นเหมาะสำหรับทำขนม เช่น กล้วยบวชชี ข้าวต้มมัด เป็นต้น (เบญจมาศ ศิลาย้อย, 2545)

กล้วยหินมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า [*Musa* (BBB Group) 'Kluai Hin'] เป็นกล้วยพันธุ์พื้นเมืองที่มีการปลูกมากในเขต 4 จังหวัดชายแดนภาคใต้ (จังหวัดยะลา ปัตตานี นราธิวาส และสงขลา) ลำต้นเทียมสูงประมาณ 3.5-4.0 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 15 เซนติเมตร กาบลำต้นด้านนอกมีสีเขียว มีนวลและไม่มีประดำ ด้านในมีสีเขียว ก้านใบไม่มีร่อง ปลีมีรูปไข่ป้อม ปลายมน สีม่วงแดง มีนวล ด้านในสีแดงเข้ม ผลมีรูปร่างคล้ายกล้วยเล็บช้างกุด แต่ขนาดใหญ่กว่า เครือหนึ่งมีประมาณ 7-10 หวี หนึ่งหวีมีประมาณ 10-15 ผล เมื่อสุกมีสีเหลือง ควรทำให้สุกด้วยความร้อนจะทำให้มีรสชาติอร่อย เช่นต้ม ย่าง เชื่อมกล้วยบวชชี ข้าวต้มผัด เป็นต้น จะมีรสชาติ

อร่อยแต่เพราะมีความนุ่มเหนียว เนื้อมีสีเหลือง เมื่อทำให้สุกจะมีสีเหลืองด่นชัดขึ้น จะได้ขนมที่น่ารับประทานมากยิ่งขึ้น (เบญจมาศ ศิลาย้อย, 2545)

2. สตาร์ชกล้วย

2.1 ปริมาณอะมิโลสของสตาร์ชกล้วย

ได้มีการรายงานปริมาณอะมิโลสของสตาร์ชกล้วยไว้แตกต่างกันขึ้นกับชนิดของพันธุ์กล้วย แสดงดัง Table 1 ดังนี้ Kayisu และ Hood (1981) พบปริมาณอะมิโลสในสตาร์ชกล้วย 16 % Ling และคณะ (1982) พบปริมาณอะมิโลสในสตาร์ชกล้วย Cavendish 19.5 % Garcia และ Lajolo (1988) พบปริมาณอะมิโลสในสตาร์ชกล้วย 17 % Waliszeweki และคณะ (2003) พบปริมาณอะมิโลสในสตาร์ชกล้วย Valery 40.7% Eggleston และคณะ (1992) ได้รายงานปริมาณอะมิโลสในสตาร์ชกล้วย plantains อยู่ในช่วง 10-11 % Siriwong และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชกล้วย 3 สายพันธุ์ คือ สตาร์ชกล้วยหักมุก สตาร์ชกล้วยน้ำว้าค่อม และสตาร์ชกล้วยตานี พบว่ามีปริมาณอะมิโลส 30.94%, 31.98% และ 31.92% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสตาร์ชจากกล้วยพื้นบ้านของไทยมีปริมาณอะมิโลส ค่อนข้างสูง

Table 1. Amylose content from various bananas.

พันธุ์กล้วย	ปริมาณอะมิโลส(%)	ที่มา
กล้วยเขียว Valery	16	Kayisu และHood (1981)
กล้วยเขียว Valery	40.7	Waliszeweki และคณะ (2003)
กล้วยเขียว Cavendish	19.5	Ling และคณะ(1982)
กล้วยน้ำว้าค่อม	31.98	Siriwong และคณะ (2003)
กล้วยตานี	31.92	Siriwong และคณะ (2003)
กล้วยหักมุก	30.94	Siriwong และคณะ (2003)

2.2 โครงสร้างของสตาร์ชกล้วย

2.2.1 ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชกล้วย

เมื่อพืชสังเคราะห์แสงได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวแล้ว จะมีกระบวนการลำเลียงน้ำตาลเหล่านั้นมาสู่ส่วนที่จะเก็บไว้เป็นพลังงาน โดยจะรวมน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเหล่านั้นเป็นพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลใหญ่ และเก็บไว้ในลักษณะกลุ่มก้อนที่เรียกว่า "เม็ดสตาร์ช" สตาร์ชต่างชนิดกันมีลักษณะ

ของเม็ดสตาร์ชแตกต่างกัน ขนาดและรูปร่างจะแปรผันตั้งแต่เม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก รูปร่างหลายมุม เช่น สตาร์ชข้าวเจ้า ไปจนถึงเม็ดสตาร์ชที่มีรูปร่างเป็นรูปไข่มีขนาดใหญ่ เช่น สตาร์ชมันฝรั่ง เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วรูปร่างของเม็ดสตาร์ชกล้วยมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ดังแสดงใน Table 2 แต่จากการส่องดูภายใต้กล้องจุลทรรศน์พบว่ามีลักษณะรูปวงรี ยาวและเป็นสันนูน แกนกลางของเม็ดสตาร์ชมีความยาว 6-20 μm แต่โดยส่วนใหญ่มีขนาด 20-60 μm (Eggleston, *et al.*, 1992)

Kayisu และ Hood (1981) ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างของสตาร์ชกล้วยสายพันธุ์ Valery ด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) แสดงดัง Figure 1 พบว่าสตาร์ชกล้วยมีลักษณะหลากหลาย คือ มีรูปร่างทรงกลม (spheroid) และแท่งยาว (elongated) โดยรูปร่างทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15-40 μm และรูปแท่งยาวมีความกว้าง 5-25 ไมโครเมตร และยาว 20-25 ไมโครเมตร พื้นผิวของเม็ดสตาร์ชจากกล้วยดิบ มีลักษณะเรียบ ในขณะที่เม็ดสตาร์ชจากกล้วยสุกจะมีลักษณะเป็นริ้ว ๆ ซึ่งเกิดจากการทำงานของเอนไซม์อะมิเลส (amylase)

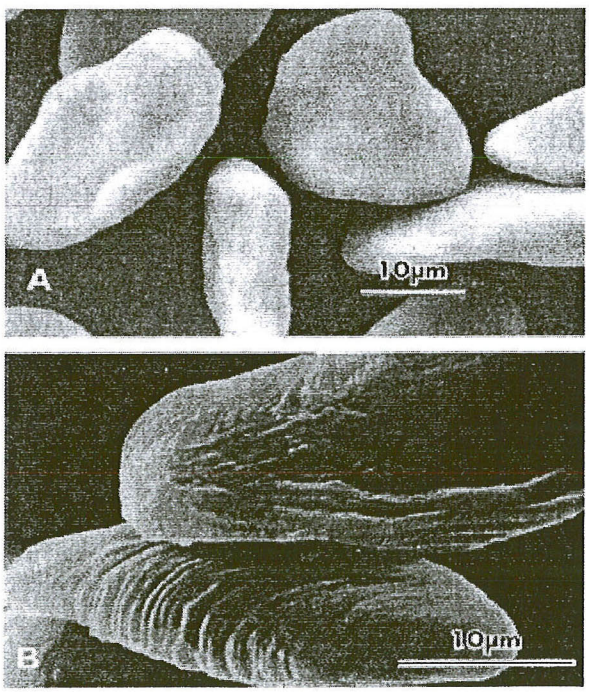

Figure 1 Morphology of starch granule from native unripe banana starch (A) and ripe banana starch (B)

ที่มา: Kayisu และ Hood (1981)

Siriwong และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชจากกล้วย 3 สายพันธุ์คือ สตาร์ชกล้วยน้ำว้าค่อม สตาร์ชกล้วยตานี และสตาร์ชกล้วยหักมุก พบว่าเม็ดสตาร์ชจากกล้วยหักมุกมีลักษณะยาว (elongated) และมีรูปร่างไม่แน่นอน เม็ดสตาร์ชจากกล้วยน้ำว้าค่อมมีรูปร่างไม่แน่นอนแต่โดยส่วนใหญ่แล้วมีลักษณะเป็นสามเหลี่ยม ส่วนเม็ดสตาร์ชจากกล้วยตานีมีขนาดเล็กที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดสตาร์ชกล้วยทั้ง 3 ชนิดและมีรูปร่างเป็นวงกลม

Table 2 Shape and size of banana starches from different varieties.

Varicties	Size (μm)	Shape	References
Green Tiwan	20-60	oval and irregular shape	Lii *et al.* (1982)
Crillo and Macho	-	oval and elongated shape	Bello-Perez *et al.* (1999)
Musa paradisiace	8-20	ellipsoidal shape	Millan-Testa *et al.* (2005)
Valery	15-40	Spheroid and elongated shape	Kayisu and Hood (1981)
Kluai Namwa	-	Triangle shape	Siriwong *et al.* (2003)
Kluai Tanee	-	ellipsoidal shape	Siriwong *et al.* (2003)
Kluai Hak Muk	-	Elongated shape	Siriwong *et al.* (2003)

หมายเหตุ – หมายถึง ไม่มีข้อมูล

2.2.2 โครงสร้างผลึกของสตาร์ชกล้วย

Siriwong และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกของสตาร์ชกล้วยพื้นบ้านของไทยคือ สตาร์ชจากกล้วยหักมุก สตาร์ชกล้วยน้ำว้าค่อมและสตาร์ชจากกล้วยตานีพบว่าสตาร์ชกล้วยหักมุก และสตาร์ชกล้วยน้ำว้าค่อม มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ B เนื่องจากปรากฏพีคที่เด่นชัดมาก (strong peak) ที่ d-spacing 5.16 Å และปรากฏ พีคที่เด่นชัดปานกลาง (medium peak) ที่ d-spacing 15.8 , 4.90 , 3.70 Å ในขณะที่สตาร์ชกล้วยตานีมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ C เนื่องจากปรากฏพีคที่เด่นชัดมาก ที่มุม (2 Theta) 5.79 และ 5.12 Å และพีคที่เด่นชัดปานกลาง ที่มุม (2 Theta) 4.61 และ3.82 Å

Bello-Perez และคณะ (1999) ได้ทำการศึกษาสตาร์ชจากกล้วยในรัฐ Guerrero ประเทศแมกซิโก สายพันธุ์ macho และ criollo ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer พบว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ A ซึ่งโดยทั่วไปแล้วรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ A เป็นสตาร์ชที่ได้จากธัญพืช ส่วน Lii และคณะ (1982) พบว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ B ในขณะที่ Jane และคณะ (1997) พบว่าสตาร์ช กล้วยมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ C ซึ่ง Zobel (1998) ได้เสนอว่าลักษณะรูปแบบโครงสร้างผลึกที่ตรวจวัดด้วยเครื่อง X-ray diffractometer ของสตาร์ชกล้วยอาจมีความแตกต่างกันได้ เนื่องจากกล้วยมีความหลากหลายของสายพันธุ์มาก ดังนั้นจะต้องมีการศึกษาด้วยเอนไซม์เพิ่มเติม เพื่อช่วยสนับสนุนผลของลักษณะโครงสร้างผลึกที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่อง X-ray diffractometer

ได้มีการศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึกของสตาร์ชกล้วย พบว่ามีโครงสร้างผลึกทั้ง 3 แบบ ดังแสดงใน Table 3

Table 3 Crystallinity type of banana starches from different varieties.

Varieites	Crystallinity type	References
Macho and Crillo	A	Bello-Perez *et al.* (1999)
Green Tiwan	B	Lii *et al.* (1982)
Kluai Namwa	B	Siriwong *et al.* (2003)
Kluai Hak Muk	B	Siriwong *et al.* (2003)
Kluai Tanee	C	Siriwong *et al.* (2003)
Varley	C	Waliszewski *et al.* (2003)
Musa paradisiace	C	Millan-Testa *et al.* (2005)

2.3. สมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชกล้วย

2.3.1 กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชกล้วย

Kayisu และ Hood (1981) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติการพองตัวของสตาร์ชกล้วยพันธุ์เวเรรี่ (Musa sp.var Valery) โดยเมื่ออุณหภูมิที่ให้แก่สตาร์ชกล้วยเพิ่มขึ้น กำลังการพองตัวและการละลายจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชกล้วยถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำสามารถเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระได้ จึงทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวซึ่งจากการศึกษาพบว่าสตาร์ชกล้วยมีการพองตัวที่จำกัด และมีรูปแบบการพองตัว 2 ขั้น ซึ่งแสดงถึงแรงแรงภายในพันธะของเม็ด

สตาร์ชที่แตกต่างกัน 2 ชนิดคือ พันธะบริเวณผลึกและพันธะบริเวณอสัณฐาน โดยสตาร์ชที่มีการพองตัวสองขั้นนี้จะมีจำนวนพันธะสูง แต่มีกำลังการพองตัวและการละลายต่ำเนื่องจากมีปริมาณอะไมโลสสูง ซึ่งปริมาณอะไมโลสจะทำให้โครงสร้างร่างแหในเม็ดสตาร์ชแข็งแรงขึ้น ทำให้พองตัวได้ต่ำ โดยในช่วงอุณหภูมิ 50-65 ^{o}C สตาร์ชกล้วยจะมีกำลังการพองตัวต่ำ เนื่องจากอุณหภูมิไม่มากพอที่จะทำลายโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชได้มาก โมเลกุลของน้ำจึงเข้าไปจับกับหมู่ไฮดรอกซิลได้น้อย การพองตัวจึงน้อยและกำลังการพองตัวจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิประมาณ 65 ^{o}C และจะมีกำลังการพองตัวสูงสุดประมาณ 25 ที่อุณหภูมิ 95 ^{o}C และเมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการพองตัวของสตาร์ชกล้วยกับสตาร์ชชนิดอื่นๆแล้วพบว่ารูปแบบการพองตัวของสตาร์ชกล้วยนั้นใกล้เคียงกับสตาร์ชถั่วเขียว(mung bean starch) ที่มีรูปแบบการพองตัวเป็น 2 ขั้นเช่นกัน และสตาร์ชกล้วยจะมีกำลังการพองตัวต่ำกว่าสตาร์ชมันสำปะหลังและสตาร์ชมันฝรั่งที่มีรูปแบบการพองตัวแบบขั้นเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเม็ด สตาร์ช กล้วยมีความแข็งแรงกว่าสตาร์ชในกลุ่มพืชหัว ส่วนความสามารถในการละลายของสตาร์ชกล้วยนั้นพบว่าจะมีความสามารถในการละลายที่ต่ำโดยมีการละลายเริ่มต้นที่อุณหภูมิประมาณ 65 ^{o}C ซึ่งใกล้เคียงกับสตาร์ชข้าวฟ่าง (milo starch)

Siriwong และคณะ (2003)ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติการพองตัวและการละลายของสตาร์ชกล้วย 3 ชนิดคือ สตาร์ช กล้วย 3 พันธุ์ ในประเทศไทยคือ สตาร์ชจากกล้วยหักมุก (Musa ABB) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ B มีปริมาณ อะไมโลสประมาณ 30.94% สตาร์ชจากกล้วยน้ำว้าค่อม (Musa ABB)ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ B มีปริมาณ อะไมโลสประมาณ 31.98% และสตาร์ชจากกล้วยตานี (Musa BB) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ C มีปริมาณ อะไมโลสประมาณ 31.92% โดยทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 55-95 ^{o}C พบว่า เมื่อให้ความร้อนกับสตาร์ชกล้วย สูงขึ้น กำลังการพองตัวจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดสตาร์ชจึงเกิดการพองตัวเพิ่มขึ้นและการละลาย โดยสตาร์ชจากกล้วยทั้ง 3 ชนิดจะมีกำลังการพองตัวและการละลายที่อุณหภูมิ 55-95 ^{o}C ดังแสดงในตารางที่ 8 โดยที่อุณหภูมิ 95 ^{o}C สตาร์ชกล้วยตานีจะมีกำลังการพองตัวและการละลายต่ำที่สุด คือ 21.43 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเม็ดสตาร์ชกล้วย ตานีมีความแข็งแรงมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชจากกล้วยทั้ง 3 ชนิด

2.3.2 การเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชกล้วย

เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำสตาร์ช พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง โมเลกุลของเม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำ และพองตัวขยายใหญ่ขึ้น ทำให้เม็ดสตาร์ชเคลื่อนไหวได้ยากเนื่องจากโมเลกุลอิสระของน้ำที่เหลือรอบเม็ดสตาร์ชน้อยลง ทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาติไนเซชัน การเกิดเจลาติไนเซชัน ไม่ได้เกิดเฉพาะอุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง แต่จะเกิดเป็นช่วงอุณหภูมิ ประมาณ 8-12 องศาเซลเซียส กระบวนการตรวจสอบกระบวนการเจลาติไนเซชัน ใน

ปัจจุบันนิยมใช้เครื่องมือ Differential Scaning Colorimeter (DSC) ที่ใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีของวัสดุในรูปฟังก์ชันกับอุณหภูมิ พอลิเมอร์ต่างๆในรูปผลึกและอสัณฐาน จะมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะได้ เมื่อได้รับความร้อน สตาร์ชเมื่ออยู่ในสภาพที่มีน้ำน้อย เมื่อได้รับความร้อนจะมีอุณหภูมิหลอมละลาย (T_M) ที่สูงมาก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมากขึ้น อุณหภูมิของการหลอมละลายลดลง การหลอมละลายคือ การเกิดเจลาติไนเซชัน อุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (peak temperature) ของความร้อนคือ ช่วงอุณหภูมิของเจลาทิไนเซชัน

Siriwong และคณะ (2003)ได้ทำการศึกษาการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชกล้วยไทย 3 สายพันธุ์ คือ สตาร์ชกล้วยหักมุก สตาร์ชกล้วยน้ำว้า และสตาร์ชกล้วยตานี พบว่า สตาร์ชกล้วยทั้ง 3 ชนิด มีอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลาติไนเซชัน(onset temperature, T_0)อยู่ในช่วง 70.96-71.97 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจลาติไนเซชัน(peak temperature, T_p) อยู่ในช่วง 75.26-77.47 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลาติไนเซชัน(conclusion temperature, T_C)เท่ากับ 82.40-85.47 องศาเซลเซียส และพลังงานที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการเกิดเจลาติไนเซชันอยู่ในช่วง 18.61-22.66 J/g

2.3.3 สมบัติความหนืดของสตาร์ชกล้วย

โดยทั่วไปแล้วเม็ดสตาร์ชกล้วยมีการพองตัวน้อย (restricted swelling) และมีความคงตัวต่อการให้ความร้อน(good stability) โดย Zhang และคณะ (2005) ได้รวบรวมผลการศึกษาความหนืดของแป้งเปียกของสตาร์ชชนิดต่างๆที่ความเข้มข้น 7 % (db) โดยใช้เครื่อง Barbender viscoamylograph ดังแสดงในตารางที่ 10 พบว่าสตาร์ชกล้วยเขียว Valery มีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด(pasting temperature)อยู่ในช่วง 67-70 ^{o}C ซึ่งต่ำกว่าสตาร์ชในกลุ่มธัญพืชแต่สูงกว่าสตาร์ชจากกลุ่มพืชหัว ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงภายในเม็ดสตาร์ชที่แข็งแรงกว่าสตาร์ชในกลุ่มพืชหัว และเมื่อพิจารณา Peak viscosity ของสตาร์ชกล้วยพบว่า มีค่าประมาณ 960 B.U. ซึ่งต่ำกว่าสตาร์ชในกลุ่มพืชหัวแสดงให้เห็นว่าสตาร์ชจากกล้วยมีการพองตัวต่ำกว่าสตาร์ชในกลุ่มพืชหัว ในช่วงของการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 ^{o}C เป็นเวลา 15 นาที พบว่า สตาร์ชกล้วยมีความหนืดสูงกว่าสตาร์ชอื่นๆและมีการเปลี่ยนแปลงของความหนืดในช่วงของการให้ความร้อนน้อยแสดงให้เห็นว่าสตาร์ชกล้วยมีความคงตัวต่อการให้ความร้อน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในช่วงของการทำให้เย็น (cooling) นั้นสตาร์ชกล้วยมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเกิดรีโทรเกเดชัน

Siriwong และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติความหนืดของแป้งเปียกของสตาร์ชกล้วย 3 พันธุ์ ในประเทศไทยคือ สตาร์ชจากกล้วยหักมุก (Musa ABB) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ B มีปริมาณ อะไมโลสประมาณ 30.94% สตาร์ชจากกล้วยน้ำว้าค่อม (Musa ABB)ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ B มีปริมาณอะมิโลสประมาณ 31.98% และสตาร์ชจากกล้วยตานี (Musa BB)

ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ C มีปริมาณอะมิโลสประมาณ 31.92% โดยใช้เครื่อง Barbender viscoamylograph ที่ระดับความเข้มข้นของสตาร์ชทั้ง 3 ชนิด 6% pH 6.9 ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่11 โดยจากการทดลองพบว่า อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดของสตาร์ชทั้ง 3 ชนิดอยู่ในช่วง 78-81 ^{o}C (Initial pasting temperature) และพบว่าสตาร์ชจากกล้วยตานีจะไม่พบการเกิด Peak viscosity ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชกล้วยทั้ง 3 ชนิดแล้วสตาร์ชจากกล้วยตานีมีการพองตัวต่ำสุด (restricted swelling) แสดงว่าความร้อนเข้าไปทำลายพันธะภายในเม็ดสตาร์ชได้ไม่มาก และสตาร์ชจากกล้วยทั้ง 3 ชนิดพบการเกิด breakdown ต่ำแสดงว่าสตาร์ชจากกล้วยทั้ง 3 ชนิดมีความคงตัวต่อความร้อน แต่พบการเพิ่มขึ้นของความหนืดในช่วงของการทำให้ เย็น (cooling) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเกิดรีโทรเกเดชัน

Nunez-Santiago และคณะ (2004) ได้ทำการทดลองศึกษาพฤติกรรมการไหลของสตาร์ชกล้วยสายพันธุ์ Macho ซึ่งมีปริมาณอะไมโลสประมาณ 40.7% ที่ระดับความเข้มข้นของสตาร์ชกล้วยแตกต่างกันคือ 3-6% ด้วยเครื่องวัดความหนืด Rotation viscometer ที่ต่อด้วยหัวทรงกระบอก (concentrict viscometer) โดยวัดที่อัตราเฉือน 0-700 s^{-1} ที่อุณหภูมิ 60 ^{o}C โดยพบว่าที่อัตราการเฉือนต่ำๆ ค่าความหนืดของสตาร์ชกล้วยมีค่าคงที่ เรียกค่าความหนืดนี้ว่า zero-shear viscosity (η_0) เมื่อมีการเพิ่มอัตราการเฉือน ความหนืดของสตาร์ชกล้วยจะมีค่าลดลงในทุกๆความเข้มข้นของสตาร์ชกล้วยที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสตาร์ชกล้วยมีพฤติกรรมการไหลแบบ Pseudoplastic หรือ shear-thinning และเมื่อพิจารณาถึงค่าดัชนีการไหล (n)พบว่าสตาร์ชกล้วยที่ระดับความเข้มข้น 3%, 4% ,5% และ 6% มีค่าดัชนีการไหลเท่ากับ 0.60, 0.61, 0.54, 0.25 ตามลำดับซึ่งสอดคล้องกับค่าดัชนีการไหล (n)ซึ่งของไหลประเภท shear-thinning เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความหนืดที่ความเข้มข้นของสตาร์ชแตกต่างกัน เมื่อความเข้มข้นของสตาร์ชกล้วยสูงขึ้น ค่าความหนืดมีค่าสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อความเข้มข้นของสตาร์ชเพิ่มขึ้นส่งผลให้การเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโมเลกุลของสตาร์ชเพิ่มสูงขึ้น ความหนืดจึงเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาถึงค่าดัชนีการไหล(n)ของสตาร์ชที่ระดับความเข้มข้น 3-6% พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสตาร์ชเพิ่มสูงขึ้นค่าดัชนีการไหลมีค่าลดลงแสดงให้เห็นว่า เมื่อสตาร์ชมีความเข้มข้นสูงขึ้นจะมีความเป็น Shear-thinning มากขึ้น

Bello-Perez และคณะ (1998) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของสตาร์ชกล้วยโดยใช้เครื่อง Brookfield viscometer และใช้ความเข้มข้นของสตาร์ชกล้วย 5% นำมาให้ความร้อนเป็นเวลา 15 และ 30 นาที จากนั้นทำให้เย็น แล้วนำสตาร์ชที่ได้มาวัดค่าความหนืดที่อัตราการเฉือนแตกต่างกันคือ 2,4,10 และ 20 rpm จากการทดลองพบว่า ความหนืดของสตาร์ชกล้วยจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราการเฉือนที่เพิ่มขึ้น โดยความหนืดของสตาร์ชกล้วยจะลดลงเมื่ออัตราการ

เฉือนเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสตาร์ชกล้วยมีพฤติกรรมการไหลแบบ Shear-thinning และเมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาในการให้ความร้อนเป็นเวลา 15 และ 30 นาทีต่อความหนืดของสตาร์ชกล้วย พบว่า สตาร์ชกล้วยที่ให้ความร้อนเป็นเวลา 30 นาที จะมีความหนืดสูงกว่าสตาร์ชกล้วยที่ให้ความร้อนเป็นเวลา 15 นาที และสตาร์ชกล้วยทนต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่อัตราการเฉือน 20 rpm นอกจากนี้ เมื่อทำการศึกษาถึงเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปต่อค่าความหนืด ที่อัตราการเฉือน 20 rpm พบว่าเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ความหนืดมีค่าคงที่ แสดงให้เห็นว่าสตาร์ชกล้วยเป็นของไหลชนิดนอนนิวโตเนียน แบบไม่ขึ้นกับเวลา (Time independent Non-newtonian fluid)

3. การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีความร้อนชื้น

การดัดแปรด้วยความร้อนชื้นเป็นการให้ความร้อนต่อสตาร์ชที่มีความชื้นต่ำ โดยอุณหภูมิที่ใช้ต้องเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิ glass transition temperature (Tg) แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเจลาติไนเซชัน (gelatinization temperature) ของสตาร์ช สภาวะที่ใช้ในการศึกษาการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นจะส่งผลให้สตาร์ชมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและปริมาณผลึก กำลังการพองตัว ความสามารถในการละลาย ความหนืด อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน การเกิดรีโทรเกรเดชัน ความสามารถของการย่อยด้วยกรดและเอนไซม์ได้ในสตาร์ชของธัญพืช พืชหัว และสตาร์ชถั่ว การดัดแปรสตาร์ชจากพืชหัวด้วยความร้อนชื้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพมากกว่าการดัดแปรสตาร์ชจากพืชตระกูลถั่วและสตาร์ชจากธัญพืช (Hoover and Vasanthan, 1994) นอกจากนี้พบว่าการดัดแปรสตาร์ชจากพืชหัวและพืชรากด้วยความร้อนชื้นมีผลให้มีการเปลี่ยนแปลงชนิดของโครงสร้างผลึก (A, B, A+B) (Hoover, 2001) เนื่องจากการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโมเลกุลของสตาร์ช การเกิดอันตรกิริยากันระหว่างสายโมเลกุลระหว่างการได้รับความร้อนชื้นในบริเวณอสัณฐาน (amorphous) การดัดแปรด้วยความร้อนชื้นเป็นการเปลี่ยนแปลงสมบัติของสตาร์ชพืชหัวให้ใกล้เคียงกับสตาร์ชจากธัญพืชได้แก่ ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน การพองตัว และการโปร่งแสงของแป้งเปียกของสตาร์ช และยังพบว่าโครงสร้างผลึกของสตาร์ชมันฝรั่งมีการเปลี่ยนแปลงจากชนิด B เป็นแบบ A+C ซึ่งคล้ายกับโครงสร้างผลึกสตาร์ชข้าวโพดและธัญพืชอื่นๆ ระดับของการเปลี่ยนแปลงที่พบขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นระหว่างการทำการให้ความร้อนชื้น ชนิดของสตาร์ช และปริมาณอะมิโลส (Hoover and Vassanthan, 1994)

3.1 ผลของการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นต่อสมบัติทางโครงสร้างของสตาร์ช

ลักษณะรูปร่างและขนาดของเม็ดสตาร์ชสามารถตรวจสอบได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน (SEM) พบว่าสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่างและขนาดของเม็ดสตาร์ชและที่ผิวของเม็ดสตาร์ชไม่มีการเสียหาย รอยแตก เนื่องมาจากการดัดแปรและยังคงมีความสมบูรณ์เหมือนกับสตาร์ชก่อนทำการดัดแปร เนื่องจากสภาวะที่ใช้ในการดัดแปรไม่ทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการเจลาติไนเซชันได้ มีเพียงการเปลี่ยนแปลงภายในเท่านั้น ทั้งในการดัดแปรในสตาร์ชพืชหัวและพืชราก (Gunaratne and Hoover, 2002) สตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชมันฝรั่ง (Kulp and Lorenz, 1981; Stute, 1992) สตาร์ชถั่ว (Hoover and Manuel, 1996a; Adebowale and Lawal, 2002; Adebowale and Lawal, 2003) สตาร์ช yam (Lawal, 2005) สตาร์ชข้าวฟ่าง (Adebowale *et al.*, 2005b)

เมื่อทำการศึกษารูปแบบและปริมาณผลึกของสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นด้วยเครื่อง XRD พบว่ารูปแบบผลึกของสตาร์ชบางชนิดมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมคือจากรูปแบบผลึกชนิด B เปลี่ยนเป็นรูปแบบผลึกชนิด A หรือ C สำหรับสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ช yam (Stute, 1992; Kawabata *et al.*, 1994; Gunaratne and Hoover, 2002; Kulp and Lorenz, 1981; Vermeylen *et al.*, 2006) การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการจัดเรียงตัวของผลึกแบบ B เป็นแบบ A สามารถยืนยันได้โดยการตรวจสอบด้วยเครื่อง ^{13}C CP/MAS (Gidley and Bociek, 1985) และพบว่าสตาร์ชท้าวยายม่อม (Arrow root) และสตาร์ชมันสำปะหลังมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบผลึกจากชนิด C เป็น A (Lorenz and Kulp, 1982) สำหรับสตาร์ชที่มีรูปแบบผลึกแบบ A พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น (Hoover and Vasanthan, 1994; Hoover and Manuel, 1996b; Adebowale *et al.*, 2005b; Kawabata *et al.*, 1994; Lawal, 2005) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่พบว่าปริมาณผลึกของสตาร์ชบางชนิดได้แก่ สตาร์ชข้าวบาร์เล่ย์ สตาร์ช triticle และสตาร์ชมันสำปะหลัง (Lorenz and Kulp, 1982; Abrahum, 1993) มีค่าลดลงเมื่อผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น สำหรับสตาร์ชจากธัญพืชบางชนิดที่ทำการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นเมื่อตรวจสอบรูปแบบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD พบพีคใหม่เพิ่มขึ้นมา 2 พีค ซึ่งเป็นพีคของลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ V ซึ่งอธิบายได้ว่าเกิดการจัดเรียงตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับไขมัน (Kawabata *et al.*, 1994; Lim *et al.*, 2001) Lim และคณะ (2001) ได้ทำการตรวจสอบพลังงานที่ใช้ในการหลอมละลายสารประกอบเชิงซ้อนอะมิโลสกับไขมันด้วยเครื่อง DSC ในสตาร์ชข้าวโพดพบว่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมละลายสารประกอบเชิงซ้อนอะมิโลสกับไขมันมีค่าเพิ่มขึ้น Hoover และ Vasanthan (1994) และ Hoover และ Manuel (1996b) ก็พบว่าปริมาณอะมิโลสปรากฏในสตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชข้าวโพดที่ทำการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นมี

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 17 มี.ค. 2555
เลขทะเบียน 243147

ค่าลดลงเนื่องมาจากมีการจัดเรียงตัวใหม่ของสายอะมิโลสกับปริมาณไขมันที่หลงเหลืออยู่ในสตาร์ชระหว่างการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น

3.2 ผลของการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นต่อสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ช

3.2.1 ผลของการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นต่อสมบัติทางความร้อน

จากการศึกษาผลของการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นต่อสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC โดยทั่วไปสตาร์ชที่ทำการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นมีอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน (To) สูงขึ้น ทั้งในสตาร์ชข้าวสาลี สตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชถั่ว สตาร์ชพืชหัวและพืชราก สตาร์ชมันเทศ สตาร์ชมันฝรั่ง สตาร์ชข้าวฟ่าง (Kulp and Lorenz, 1981; Hoover and Manuel, 1996a; Hoover and Manuel, 1996b; Collado and Corke, 1999; Takaya *et al.*, 2000; Lim *et al.*, 2001; Gunaratne and Hoover, 2002; Adebowal and Lawal, 2003; Adebowale *et al.*, 2005b) ทั้งนี้เนื่องมาจากสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นมีการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างของเม็ดสตาร์ช ซึ่งการเปลี่ยนแปลงหลักๆ ได้แก่ การเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายของอะมิโลส (AM-AM) และการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายอะมิโลสและไขมัน (AM-lipid complex) นอกจากนี้การดัดแปรด้วยความร้อนชื้นส่งผลให้โมเลกุลภายในสตาร์ชเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ที่เป็นระเบียบทำให้พันธะภายในโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงขึ้นต้องใช้อุณหภูมิสูงในการเกิดเจลาติไนเซชัน (Hoover and Manuel, 1996b) ส่วนพลังงานในการเกิดเจลาติไนเซชัน (ΔH) ของสตาร์ชมีแนวโน้มลดลงเนื่องมาจากการที่สายเกลียวคู่ (double helix) บางส่วนที่อยู่ในบริเวณผลึกของสตาร์ชอาจเกิดการคลายเกลียวมากขึ้น (Hoover and Manuel, 1996b; Gunaratne and Hoover, 2002; Lim *et al.*, 2001) สำหรับช่วงของอุณหภูมิในการเกิดเจลาติ-ไนเซชัน (Tc-To) มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายอะมิโลสกับอะมิโลส (AM-AM) อะมิโลสกับอะมิโลเพคติน (AM-AMP) หรือสายอะมิโลสกับไขมัน (AM-lipid) ระหว่างการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น (Hoover and Manuel, 1996b) Lim และคณะ (2001) พบว่าการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นในบางกรณีทำให้ลักษณะของกราฟการดูดความร้อนเป็นแบบไบฟาสิก (biphasic endotherm) ในสตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชข้าวโพด (Donovan *et al.*, 1983; Lim *et al.*, 2001)

3.2.2 ผลของการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นต่อความสามารถในการพองตัวและการละลาย

การดัดแปรด้วยความร้อนชื้นส่งผลให้ค่ากำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายลดลงสามารถอธิบายได้ว่าระหว่างการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นอาจเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโมเลกุลของอะมิโลส (AM-AM) สายโมเลกุลของอะมิโลสกับอะมิโลเพคติน (AM-AMP) (Hoover and Manuel, 1996a; Gunaratne and Hoover, 2002) Cooked และ Gidley (1992) อธิบาย

ว่าอันตรกิริยาภายในเม็ดสตาร์ชแข็งแรงมากขึ้น อาจเป็นผลมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอะมิโลสและไขมันระหว่างการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น ซึ่งส่งผลให้กำลังการพองตัวลดลง โดยพบในสตาร์ชธัญพืช สตาร์ชถั่ว และสตาร์ชพืชหัวและพืชราก (Hoover and Manuel, 1996a; Hoover and Manuel, 1996b; Gunaratne and Hoover, 2002) Tester และ Morrison (1990) รายงานว่าการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมันภายในเม็ดสตาร์ชของสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชข้าวโพดเหนียวจะยับยั้งกำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายของเม็ดสตาร์ชได้

3.2.3 ผลของการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นต่อความหนืดของสตาร์ช

การดัดแปรสตาร์ชด้วยความร้อนชื้นส่งผลให้สมบัติทางด้านความหนืดของสตาร์ชที่ทำการวัดด้วยเครื่อง Brabender viscograph หรือ RVA มีการเปลี่ยนแปลงไป โดยพบว่าอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Tp) ของสตาร์ชมันฝรั่ง สตาร์ชข้าวโอ๊ต สตาร์ช lentil และสตาร์ชจากกลอย (Kulp and Lorenze, 1981; Hoover and Vasanthan, 1994) มีค่าสูงขึ้นเมื่อผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น เนื่องจากเม็ดสตาร์ชสามารถทนต่อความร้อนได้มากขึ้นเนื่องจากความแข็งแรงของพันธะภายในเม็ดสตาร์ชที่เพิ่มมากขึ้น (Stute, 1992) สำหรับค่าความหนืดสูงสุด (Pv) มีค่าลดลง อันตรกิริยาระหว่างสายและภายในสายของโมเลกุลสตาร์ชเพิ่มขึ้น ได้แก่ การเกิดอันตรกิริยากันของสายอะมิโลสและอะมิโลเพคติน (AM-AMP) และสายอะมิโลสกับลิปิด (AM-lipid) ระหว่างการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น (Hoover and Manuel, 1996 a,b) นอกจากนั้นพบว่าค่า breakdown (BD) ของสตาร์ชถั่วมีค่าลดลงเมื่อผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นเนื่องมาจากการจัดเรียงตัวใหม่ภายในเม็ดสตาร์ชส่งผลให้เม็ดสตาร์ชทนต่อความร้อนและแรงเฉือนมากขึ้นจึงแตกตัวได้น้อยลง (Adebowale and Lawal, 2002; Adebowale and Lawal, 2003)

3.2.4 ผลของการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นต่อสมบัติวิสโคอีลาสติก

Eerlingen และคณะ (1997) ได้ทำการศึกษาสมบัติวิสโคอีลาสติกของสตาร์ชมันฝรั่งที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น โดยศึกษาค่า storage modulus (G') ที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่างๆ (3, 6 และ 20%w/w) พบว่าค่า G' ของสตาร์ชที่ความเข้มข้นสูงขึ้นมีค่าสูงขึ้น เนื่องมาจากการพองตัวและมีการเกิดอันตรกิริยากันของสายโมเลกุลที่อยู่ใกล้กันมากขึ้น และพบว่าการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นทำให้ค่า G' ของสตาร์ชมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างเม็ดสตาร์ชส่งผลให้เม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้นและกำลังการพองตัวของเม็ดสตาร์ชมีค่าลดลง

3.2.5 ผลของการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นต่อสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชัน

การศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวโพดด้วยเครื่อง DSC ที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น พบว่าอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรเร็วกว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Takaya *et al.*, 2000) แต่จากการศึกษาค่าความแข็ง (Hardness) ค่าการเกาะติด (Adhesievness) ของเจลสตาร์ชมันเทศมีค่าลดลงเมื่อสตาร์ชผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น (Collado and Corke, 1999; Singh *et al.*, 2005) เมื่อศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยวิธีการวัดปริมาณน้ำที่ถูกบีบออกจาก (syneresis) จากเจลสตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสปาน กลางและสูงพบว่าการเกิดรีโทรเกรเดชันมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นส่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลภายในบริเวณอสัณฐานของเม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้น ดังนั้นปริมาณน้ำที่ไหลเยิ้มออกมาจึงน้อยกว่า (Hoover and Manuel, 1996b)

4. การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชัน (hydroxypropyration)

การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการไฮดรอกซีโพรพิเลชันเป็นการดัดแปรสตาร์ชทางเคมีแบบอีเทอร์ริฟิเคชัน (etherification) เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชกับสารโพรพิลีนออกไซด์ (propylene oxide)ในสภาวะเบส ทั้งนี้การดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันต้องไม่ให้เม็ดสตาร์ชเกิดการเจลาติไนซ์ (Whistler, 1964) โดยปฏิกิริยาเกิดขึ้นภายในเม็ดสตาร์ชกับสารที่เข้าทำปฏิกิริยาภายใต้สภาวะเบส ซึ่งระดับการแทนที่ของปฏิกิริยาไฮดรอกซีโพรพิเลชันอนุญาตให้ใช้ได้ในระดับ DS 0.02-0.2 หรือไม่เกิน 0.2 (DS≤0.2) (Whistler and BeMiller, 1997) ซึ่งการแทนที่ด้วยหมู่ฟังก์ชัน 1 หมู่ภายในโมเลกุลของสตาร์ชอีเทอร์ ส่งผลให้โครงสร้างของเม็ดสตาร์ชเปลี่ยนแปลงไปโดยไปยับยั้งการคืนตัวของเม็ดสตาร์ชส่งผลให้เม็ดสตาร์ชมีความหนืดคงตัว ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียกว่าสตาร์ชอีเทอร์ จัดเป็นสตาร์ชสเตบิไลซ์ (stabilized starch) (Whistler and BeMiller, 1997) เนื่องจากการแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซีโพรพิลในเม็ดสตาร์ช ทำให้ความแข็งแรงของพันธะในเม็ดสตาร์ชลดลง สามารถพองตัวได้ในน้ำเย็น ได้แป้งเปียก (paste) ที่มีความใส มีความเหนียวมากขึ้น และเนื้อสัมผัสที่ดี ส่งผลให้แป้งที่ได้จะมีความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลาย ซึ่งเหมาะสำหรับใช้กับอาหารที่ต้องเก็บรักษาไว้ในสภาวะที่เย็น Tuschhoff (1986 อ้างโดย กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

4.1 สารเคมีสำหรับใช้ในการดัดแปร

สารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาชนิดนี้โดยทั่วไปแล้วสามารถใช้ได้ทั้งเอทีลีนออกไซด์หรือโพรพิลีนออกไซด์ แต่ส่วนใหญ่นิยมใช้โพรพิลีนออกไซด์ เนื่องจากสารโพรพิลีนออกไซด์เป็นสารที่ค่อนข้างใช้งานได้ง่ายและปลอดภัย โดยในปฏิกิริยานี้มีการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์และ

โซเดียมคลอไรด์ลงไปในสตาร์ชก่อนการเติมสารโพรพิลีนออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้เม็ดสตาร์ชสามารถพองตัวได้ดีขึ้นและสามารถดูดซับสารเคมีได้มาก ด้วยเหตุนี้การทำปฏิกิริยาในสภาวะเบสส่งผลให้สตาร์ชสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่โซเดียมคลอไรด์ไปช่วยลดการพองตัวของเม็ดสตาร์ชที่มากเกินไปจนอาจทำให้เกิดการเจลาติไนซ์

4.2 ปฏิกิริยาเคมีของการดัดแปร

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นของวิธีการไฮดรอกซีโพรพิเลชัน เกิดระหว่างสตาร์ชกับสารโพรพิลีนออกไซด์ในสภาวะเบส โดยส่วนใหญ่เกิดการแทนที่ตรงหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่สอง โดยหมู่ที่เข้าแทนที่ภายในโมเลกุลของเม็ดสตาร์ชเป็นหมู่ไฮดรอกซีโพรพิล ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นไฮดรอกซีโพรพิลสตาร์ช Pal และคณะ (2002) พบว่าหมู่ไฮดรอกซีโพรพิลที่เข้าทำปฏิกิริยาในสายโซ่ของสตาร์ชสามารถทำลายพันธะไฮโดรเจนที่อยู่ระหว่างโมเลกุลและภายในโมเลกุลของสตาร์ช ส่งผลให้โครงสร้างของเม็ดสตาร์ชอ่อนตัวลง ทำให้เม็ดสตาร์ชสามารถดูดซับน้ำได้เพิ่มขึ้น นอกจากผลของหมู่ไฮดรอกซีโพรพิลแล้วการแทนที่สามารถทำให้เม็ดสตาร์ชสามารถดูดซับน้ำได้ง่าย เนื่องมาจากการที่มีหมู่ที่ชอบน้ำภายในโมเลกุลของสตาร์ช ซึ่งทั้งสองปัจจัยมีผลให้สตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการไฮดรอกซีโพรพิเลชันมีกำลังการพองตัวสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชที่ยังไม่ได้ผ่านการดัดแปร ซึ่งสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรจะมีลักษณะของแป้งเปียกที่ใสขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร โดยข้อเท็จจริงหมู่ไฮดรอกซีโพรพิลโดยทั่วไปมีสมบัติเป็นหมู่ที่ชอบน้ำด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้โมเลกุลของน้ำสามารถผ่านเข้าไปภายในโครงสร้างโมเลกุลของเม็ดสตาร์ชซึ่งง่ายต่อการเกิดเจลของสตาร์ช ดัง Figure 2

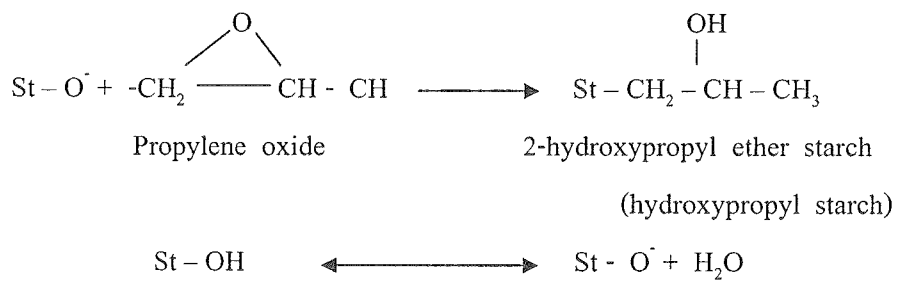

Figure 2. Hydroxyalkylation reaction of between starch and propylene oxide.
ที่มา : Sanders, 1996 อ้างโดย กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546

Pal และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาผลของระดับความเข้มข้นของสารโพรพิลีนออกไซด์ต่อสมบัติการเกิดแป้งเปียกของสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชรากสาคูที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชัน โดยใช้ระดับการแทนที่โมลาร์ (MS) ต่างกัน 5 ระดับจาก 0.025-0.13 จากผลการตรวจสอบหากำลังการพองตัวของสตาร์ชทั้งสองชนิด พบว่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชรากสาคูและสตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านการดัดแปรมีกำลังการพองตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร ทั้งนี้เมื่อค่า MS เพิ่มขึ้นกำลังการพองตัวของสตาร์ชทั้งสองชนิดก็เพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้เมื่อทำการวัดร้อยละของการส่องผ่าน พบว่าสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชรากสาคูที่ผ่านการดัดแปรค่าความใสเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร และเมื่อค่า MS เพิ่มขึ้นค่าความใสของสตาร์ชทั้งสองชนิดก็เพิ่มขึ้นด้วย เมื่อทำการตรวจสอบคุณลักษณะทางความหนืดด้วยเครื่อง Brabender พบว่าเมื่อค่า MS เพิ่มขึ้นสตาร์ชดัดแปรทั้งสองชนิดแสดงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันมีค่าลดลง ค่าความหนืดสูงสุดของสตาร์ชข้าวโพดดัดแปรมีค่าสูงกว่าสตาร์ชที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร โดยค่าความหนืดสูงสุดที่ค่า MS 0.05 และ 0.075 มีค่าเพิ่มขึ้นจากสตาร์ชที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร ในขณะที่สตาร์ชดัดแปรที่มีค่า MS 0.10 มีค่าความหนืดสูงสุดลดลง ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชมีความอ่อนแอลงอย่างมาก ซึ่งเหมาะแก่การเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซีโพรพิลได้สูงขึ้น จากค่า Breakdown ของสตาร์ช พบว่าเมื่อสตาร์ชข้าวโพดดัดแปรมีค่า MS เท่ากับ 0.1 ไม่แสดงการเกิด Breakdown เมื่อคงอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเปรียบเทียบความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลาย พบว่าทั้งสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชรากสาคูที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรแสดงการบีบน้ำออกจากโครงสร้างตั้งแต่รอบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อทำการดัดแปรสตาร์ชทั้งสองชนิดโดยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันโดยค่า MS ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้สตาร์ชมีความคงตัวต่อการแช่แข็งและการทำละลายเพิ่มขึ้น ทั้งนี้สตาร์ชรากสาคูที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันที่มีค่า MS 0.10–0.13 ไม่เกิดการแยกตัวของชั้นน้ำเมื่อทำการแช่แข็งและการละลาย 21 และ 22 รอบ ในขณะที่สตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันที่มีค่า MS 0.13 แสดงการบีบน้ำออกจากโครงสร้างหลังจากผ่านการแช่แข็งและการละลายนาน 9 รอบ

วัตถุประสงค์

1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้าง และคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหิน

2 ศึกษาผลของการดัดแปรทางกายภาพด้วยความร้อนชื้นต่อโครงสร้างและสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหิน

3 ศึกษาผลของการดัดแปรทางเคมีด้วยวิธีไฮดรอกซิลโพรพิเลชันต่อโครงสร้างและสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหิน

4 ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้สตาร์ชกล้วยที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีกายภาพและทางเคมีในผลิตภัณฑ์อาหารและบรรจุภัณฑ์