

วัตถุประสงค์

1. ผลิตและตรวจสอบร้อยละผลได้ของแป้งกล้วย ได้แก่ กล้วยน้ำว่า กล้วยหอมทอง และกล้วยไข่
2. สกัดสตาร์ชจากแป้งกล้วยทั้งดิบทั้ง 3 สายพันธุ์
3. เปรียบเทียบสมบัติทางฟิสิกส์ เคมี และเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยดิบทั้ง 3 สายพันธุ์

ตรวจเอกสาร

กล้วยเป็นผลไม้ที่มีการปลูกกันมากเพราะเป็นผลไม้ที่รับประทานกันเป็นประจำ รับประทานง่าย มีประโยชน์ ราคาถูกและการปลูกลงทุนต่ำกว่าพืชอื่น ให้ผลผลิตได้ทั้งปีไม่ต้องอาศัยสภาวะการปลูกเป็นพิเศษ ปลูกได้ทั้งในเขตร้อน และเขตกึ่งร้อน พื้นที่ในการผลิตกล้วยของโลกแบ่งออกเป็น เขตเอเชียแปซิฟิก, เขตลาตินอเมริกาและแคริบเบียน และเขตแอฟริกา (เบญจมาศ, 2545)

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของกล้วย

1. สายพันธุ์ของกล้วย

กล้วยเป็นไม้ล้มลุกขนาดใหญ่ มีอายุหลายปี อยู่ในวงศ์ *Musaceae* เมื่อโตเต็มที่อาจมีความสูง 2-9 เมตร ลำต้นที่แท้จริงของกล้วยเกิดเป็นเหง้าอยู่ใต้ผิวดิน ส่วนลำต้นที่มองเห็นเป็นลำต้นเทียม ประกอบไปด้วยกาบใบที่อัดกันแน่น ทรงพุ่มส่วนบนของลำต้นประกอบด้วยใบและช่อดอกที่เกิดมาจากจุดเจริญของเหง้า ภายในลำต้นเทียมจะมีท่อน้ำเลี้ยงเต็มไปด้วยน้ำยางอยู่ตลอดทุกส่วนของลำต้น มีลักษณะเป็นกรดอ่อน ๆ และมีรสฝาด (สมศักดิ์, 2546)

อนุกรมวิธานได้จัดจำแนกกล้วยตามลำดับ ดังนี้ (สมศักดิ์, 2546)

ชั้น (Class)	⇒	<i>Monocotyledoneae</i>
อันดับ (Order)	⇒	<i>Zingiberales</i>
วงศ์ (Family)	⇒	<i>Musaceae</i>
สกุล (Genus)	⇒	<i>Musa</i>
ตอน (Section)	⇒	<i>Eumusa</i>
ชนิด (Species)	⇒	spp.

ชนิดของกล้วยปลูกหรือกล้วยกินได้ เกิดมาจากกล้วยป่า 2 ชนิด (species) คือ *Musa acuminata* Colla และ *Musa balbisiana* Colla (เบญจมาศ, 2545) การจำแนกชนิดของกล้วยกินได้ในประเทศไทยใช้วิธีของ Simmonds and Shepherd (1955) และการนับจำนวนของโครโมโซม (chromosome) โดยใช้การให้คะแนนเพื่อเป็นการบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ของกล้วยป่าที่เป็น

บรรพบุรุษทั้งสองชนิด จากลักษณะภายนอก 15 ลักษณะ(เบญจมาศ,2545) (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 การให้คะแนนลักษณะต่าง ๆ ของกล้วย

ลักษณะ	<i>M. acuminata</i> (A genome)	<i>M. balbisiana</i> (B genome)
สีของกาบใบ	มีจุด หรือเป็นสีน้ำตาล หรือดำ	มีจุดจาง ๆ หรือไม่มีเลย
ร่องของกาบใบ	ขอบของก้านใบตั้ง หรือแผ่กาง ออก มีกรีบหรือปีก	ขอบของก้านใบม้วนเข้าหากันจน ชิดไม่มีปีก
ก้านช่อดอก	มีขน	เรียบไม่มีขน
ก้านดอก	สั้น	ยาว
โอวูล (ไข่)	มีโอวูล 2 แถวในแต่ละช่องของ รังไข่	มีโอวูล 4 แถว แต่ไม่สม่ำเสมอ
ไหล่ของกาบปลี	อัตราส่วน < 0.28	อัตราส่วน < 0.30
การม้วนของกาบปลี	กาบปลีม้วนขึ้นไปทางหลัง หลังจาก ดอกบาน	กาบปลีชูตั้งขึ้นเมื่อดอกบาน, ไม่ ม้วนขึ้น
รูปร่างของกาบปลี	Lanceolate หรือ ovate แฉก ๆ	Ovate กว้าง
ปลายของกาบปลี	แหลม (acute)	มน (obtuse)
การขีดของกาบปลี	กาบปลีด้านในเริ่มขีดจากโคนถึง ปลาย	มีสีแดงตลอดสม่ำเสมอ
รอยแผลของกาบปลี	มีลักษณะโหนกเป็นสันเห็นชัด (prominent)	โหนกไม่เป็นสัน
กลีบรวมดียว (free tepal)	ที่ปลายมีรอยย่นเห็นชัด (corrugate)	โหนกไม่เป็นสัน
สีของดอกตัวผู้	ครีมปนขาว	ชมพูอ่อน
สีของดอกตัวเมีย	ส้มค่อนข้างเหลือง	ครีม เหลืองซีด หรือชมพูอ่อน ๆ
สีของกาบปลี	กาบปลีข้างนอกสีแดง ม่วงเข้ม หรือเหลือง ส่วนด้านในสีชมพู ม่วง เข้ม และเหลือง	ด้านนอกสีม่วงอมน้ำตาล ด้านในสีแดงสด

ที่มา: เบญจมาศ (2545)

จากตารางที่ 1 ถ้าลักษณะที่นำมาจำแนกมีลักษณะเหมือน *M. acuminata* ถือว่าได้ยื่นจากกล้วยป่า ให้ 1 คะแนน และมีอีโนมเป็น A ซึ่งมาจากคำว่า *acuminate* หากมีลักษณะเหมือนกล้วยตานี *M. balisiana* ให้ 5 คะแนน และมีอีโนมเป็น B ซึ่งมาจาก *balisiana* แต่ถ้าลักษณะของกล้วยอยู่ระหว่าง 2 species นี้ ให้เป็นคะแนน 2, 3, หรือ 4 แล้วแต่ว่าลักษณะนั้น ๆ มีแนวโน้มว่าจะเป็นทางใด คะแนนรวมที่ได้จาก 15 ลักษณะ จากวิธีดังกล่าว Simmonds and Shepherd (1995) แยกออกได้เป็น 5 กลุ่ม ตามอีโนมของกล้วยทั้ง 2 ชนิด ดังนี้ (เบญจมาศ, 2545)

คะแนน	15-23	คะแนน	อยู่ในกลุ่ม	AA, AAA
	24-46	คะแนน	อยู่ในกลุ่ม	AAB
ประมาณ	49	คะแนน	อยู่ในกลุ่ม	AB
	59-63	คะแนน	อยู่ในกลุ่ม	ABB
ประมาณ	ประมาณ	คะแนน	อยู่ในกลุ่ม	ABBB

การจำแนกสายพันธุ์ของกล้วย ตามแหล่งที่ปลูก สามารถแบ่งเป็นกลุ่มตามจีโนมดังนี้ (ดวงแก้ว, 2544)

กลุ่ม AA (AA group) เป็นกล้วยที่ปลูกกันแพร่หลาย มีรสหวาน ผิวบาง พบมากในประเทศปาปัวนิวกินี ประเทศมาเลเซีย และประเทศไทย กล้วยที่พบในประเทศไทย คือ กล้วยไข่ กล้วยเล็บมือนาง กล้วยน้ำอ้อม กล้วยน้ำไท กล้วยหอมจันทร์ กล้วยสา

กลุ่ม AAA (AAA group) มีถิ่นกำเนิดแถบประเทศมาเลเซีย แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ กรอส มิเชล (Gros Michel) คาเวนดิช (Cavendish) และกล้วยครั้ง กล้วยนาก

กลุ่มกรอส มิเชล มีลักษณะเครือใหญ่ ผลใหญ่ ได้แก่ กล้วยหอมทอง

กลุ่มคาเวนดิช มีลักษณะเครือและผลอยู่สูงและบางชนิดอยู่เตี้ย ได้แก่ กล้วยหอมเขียว กล้วยหอมเขียวค่อม กล้วยหอมค่อม

กลุ่มกล้วยครั้ง กล้วยนาก กล้วยกุ้ง ลักษณะผลมีสีแดงอมม่วง

กลุ่ม AB (AB group) มีถิ่นกำเนิดแถบประเทศอินเดีย กล้วยชนิดนี้ไม่มีทั่วไปในเมืองไทย

กลุ่ม AAAA (AAAA group) มีถิ่นกำเนิดแถบอินเดียนตะวันตก กล้วยชนิดนี้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติที่ปาปัวนิวกินี และเกิดขึ้นจากการผสมพันธุ์โดยมนุษย์

กลุ่ม AAB (AAB group) มีถิ่นกำเนิดแถบอินเดียและมาเลเซียตะวันออก กล้วยในกลุ่มนี้มีอยู่หลายชนิด ได้แก่ กล้วยกล้วย กล้วยนมสวรรค์ กล้วยลังกา กล้วยร้อยหวี กล้วยไขโบราณ กล้วยนมสาว กล้วยขม กล้วยงาช้างและกล้วยนิ้วจรเข้

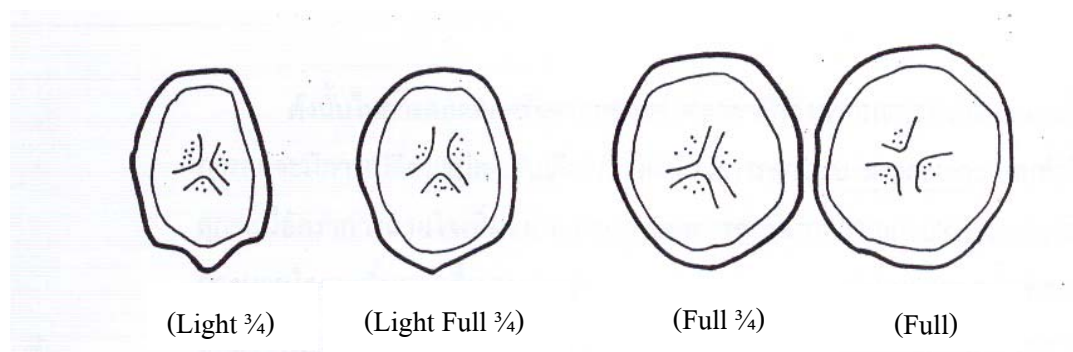
กลุ่ม ABB (ABB group) มีถิ่นกำเนิดแถบอินเดียและมาเลเซีย ลักษณะเครือ มีผลไม้แน่น ผลใหญ่มีเหลี่ยม เนื้อมีแป้งมาก เมื่อสุกก้านเครือยาวและห้อยลง ได้แก่ กล้วยหักมุก และลักษณะเครือมีผลเล็ก เมื่อสุกกินได้ เช่น กล้วยน้ำว่า ในเมืองไทยมีการกลายพันธุ์ ทำให้เกิดกล้วยอีกหลายชนิด เช่นกล้วยน้ำว่าแดง กล้วยน้ำว่าค่อม กล้วยน้ำว่าไส้เหลือง

กลุ่ม AB BB (AB BB group) พบมากในไทย พม่า ลักษณะของปลีหลุดหายไป หลังจากติดผลแล้ว ได้แก่ กล้วยเทพรส

กลุ่ม BBB (BBB group) ได้แก่ กล้วยเล็บช้างกุด

2. ระยะการเก็บเกี่ยวของกล้วย

กล้วยเป็นผลไม้ประเภท Climacteric คือ เมื่อผลสุกจะมีการหายใจเพิ่มขึ้น และต้องการเอทิลินมาช่วยกระตุ้นให้เกิดการสุก เมื่อกล้วยสุกจะมีการสร้างเอทิลินเพิ่มขึ้น เอทิลินนี้อาจจะได้จากภายนอกในรูปแบบของสารละลาย หรือแก๊สก็ได้ ซึ่งการใช้เอทิลินจากภายนอกนี้ เรียกว่า การบ่ม กล้วยสุกจะมีการเปลี่ยนแปลงจากแข็งเป็นน้ำตาล มีการเปลี่ยนแปลงสีผิวหรือเปลือก เนื้อในนุ่มขึ้น และมีกลิ่นหอม (เบญจมาศ, 2545) โดยทั่ว ๆ ไปการเก็บเกี่ยวกล้วยมักนิยมพิจารณาขนาดของเหลี่ยมกล้วยเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากความแก่ของผลกล้วยจะมีความสัมพันธ์กันอย่างมากกับมุมของเหลี่ยมผล (สมศักดิ์, 2546) สำหรับมาตรฐานความแก่ของกล้วยที่ใช้เหลี่ยมของผลเป็นเกณฑ์ ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 รูปร่างตามขวางของผลกล้วยเมื่ออายุต่างกัน

หมายเหตุ	Light $\frac{3}{4}$	หมายถึง	ผลมีขนาดครึ่งหนึ่งของผลที่โตเต็มที่หรือมีความ
	Light Full $\frac{3}{4}$	หมายถึง	ผลที่มีเหลี่ยมเห็นชัด มีความแก่ประมาณ 80%
	Full $\frac{3}{4}$	หมายถึง	ผลที่มีเหลี่ยมแต่ไม่ชัดเจน มีความแก่ประมาณ 90%
	Full	หมายถึง	ผลที่ไม่มีเหลี่ยมเลย เรียกว่า แก่เต็มที่ 100%

ที่มา: เบญจมาศ (2538)

ระยะเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมอาจพิจารณาจากลักษณะอื่น เช่น การนับจำนวนวันของกล้วย โดยเริ่มนับจากวันที่ปลีกล้วยโผล่ออกมาให้เห็นจนถึงวันเก็บเกี่ยวได้ หรือเริ่มต้นจากวันที่กาบดอกของหวีแรกเปิดออกจนถึงวันเก็บเกี่ยว หรือการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลกล้วย และการพิจารณาจากขนาดมุมเหลี่ยมของกล้วย (สมศักดิ์, 2546)

นอกจากนี้ CSIRO (1972) ได้แบ่งขั้นตอนในการสุกของกล้วย หลังจากตัดมาบ่ม ดังนี้ (เบญจมาศ, 2545)

ระยะที่ 1 เปลือกเขียว ผลแข็ง ไม่มีการสุก

ระยะที่ 2 เริ่มเปลี่ยนสีจากเขียวออกเหลืองนิด ๆ

ระยะที่ 3 เริ่มเปลี่ยนสีจากเขียวออกเหลืองมากขึ้นแต่ยังมีสีเขียวมากกว่าสีเหลือง

ระยะที่ 4 เริ่มเปลี่ยนสีจากเขียวออกเหลืองและมีสีเหลืองมากกว่าสีเขียว

ระยะที่ 5 เปลือกเป็นสีเหลือง แต่ปลายยังเป็นสีเขียว

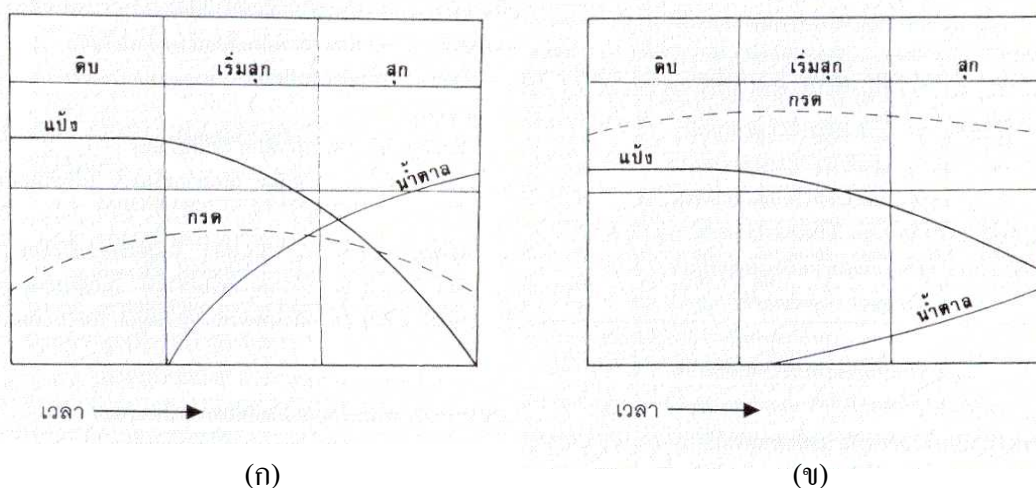
ระยะที่ 6 ทั้งผลมีสีเหลือง (ผลสุก)

ระยะที่ 7 ผิวสีเหลืองและเริ่มมีจุดสีน้ำตาล (สุกเต็มที่ มีกลิ่นหอม)

ระยะที่ 8 ผิวสีเหลือง และเริ่มมีจุดสีน้ำตาลมากขึ้น (สุกมากเกินไป, เนื้อเริ่มอ่อนตัว และมีกลิ่นแรง)

3. ความสัมพันธ์ระหว่างสายพันธุ์กับระยะการสุกของกล้วยและองค์ประกอบทางเคมี

การสุกของกล้วยทำให้คุณค่าทางอาหารเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะแป้งซึ่งมักจะมีมากในผลกล้วยดิบจะเริ่มลดลง และเปลี่ยนเป็นน้ำตาลมากขึ้น ในกล้วยกินได้ที่มีจีโนม AA, AAA เช่น กล้วยไข่ กล้วยหอม ปริมาณของแป้งจะลดลงอย่างมากเมื่อกล้วยสุก โดยจะเริ่มลดลงเมื่อกล้วยเริ่มมีการเปลี่ยนสี สำหรับปริมาณของกรดตั้งแต่ดิบจนสุกจะค่อนข้างต่ำ ถ้ากล้วยนั้นมีจีโนม ABB ปริมาณแป้งลดลงแต่ไม่มากเท่ากล้วยในกลุ่มแรก ความหวานมากขึ้นแต่ไม่เท่าในกลุ่มแรกเช่นกัน แต่ปริมาณของกรดมีค่อนข้างสูง ดังนั้นจะเห็นว่ากล้วยเหล่านี้ เช่น กล้วยน้ำว้า กล้วยหักมุก มักจะมีแป้งมากเมื่อดิบ และแม้สุกและปริมาณแป้งก็ยังมีอยู่มาก จึงทำให้เกิดความเหนียว และมีรสเปรี้ยวเล็กน้อย ดังภาพที่ 2ก และ 2ข



ภาพที่ 2 การเปรียบเทียบปริมาณสตาร์ชและน้ำตาลในการสุกของกล้วย

หมายเหตุ (ก) กล้วยกลุ่ม AA, AAA ผลดิบมีแป้งมาก สุกแล้ว หวาน

(ข) กล้วยกลุ่ม AAB, ABB ผลมีแป้งมากทั้งดิบและสุก

ที่มา: เบญจมาศ (2545)

การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีภายในผลกล้วย ระหว่างระยะเวลาการสุกมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา โดยเฉพาะปริมาณของสตาร์ชที่มีการเปลี่ยนแปลง คือ ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อถึงระยะที่ผลกล้วยสุกเต็มที่ (ripening stage) (เบญจมาศ, 2545) ดังนั้นการสกัดสตาร์ชจากกล้วยจึงต้องคำนึงถึงระยะการเก็บเกี่ยวของกล้วย ที่ให้ปริมาณสตาร์ชมากที่สุด

Lii *et al.* (1982) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมี ของกล้วยพันธุ์จากประเทศไต้หวันที่ระยะการสุกต่าง ๆ โดยการบ่มด้วยก๊าซเอทิลีน และทำการแบ่งระยะของการสุกออกเป็น 8 ระยะ โดยพิจารณาจากสีเปลือกของผลกล้วย พบว่าแต่ละระยะของการสุกนั้นปริมาณองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณโปรตีน ไขมัน และเส้นใยมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ส่วนปริมาณเถ้ามีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย แต่ปริมาณสตาร์ชจะมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ในระยะที่ 0 ซึ่งเปลือกของผลกล้วยยังมีสีเขียว และผลของกล้วยยังไม่มีการใช้ก๊าซเอทิลีนเนื่องจากยังไม่เกิดการสุก พบว่า ที่ระยะดังกล่าวมีปริมาณสตาร์ชร้อยละ 61.74 และค่อย ๆ ลดลงจนเหลือร้อยละ 2.58 ที่ระยะที่ 8 ซึ่งเป็นระยะที่เปลือกของผลกล้วยมีสีเหลืองและเริ่มมีจุดสีน้ำตาล ปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีที่ระยะการสุกต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อกล้วยที่ระยะการสุกต่าง ๆ

(หน่วย: ร้อยละ)

ระยะการสุก	น้ำตาลรีดิวซ์	ซูโครส	โปรตีน	ไขมัน	เส้นใย	สตาร์ช	เถ้า
0	0.34	1.23	5.30	0.78	0.49	61.74	3.28
1	1.30	6.01	5.62	0.80	0.49	58.58	3.31
2	10.76	18.42	4.88	0.75	0.60	42.42	3.53
3	11.45	21.35	4.93	0.73	0.62	39.78	3.54
4	12.39	27.88	5.38	0.74	0.68	37.59	3.58
5	25.00	53.07	5.77	0.76	0.78	9.70	3.90
6	31.22	51.89	5.65	0.71	0.49	6.30	3.73
7	33.82	51.98	5.60	0.83	0.30	3.33	4.05
8	33.57	53.22	5.52	0.68	0.30	2.58	4.09

ที่มา: Lii *et al.* (1982)

นอกจากนี้ ในปี ค.ศ. 2000 Mota *et al.* ได้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของแป้งกล้วยที่ได้จากกล้วย 8 สายพันธุ์ซึ่งเป็นสายพันธุ์จากประเทศเม็กซิโก ได้ผลดังตารางที่ 3 พบว่า องค์ประกอบหลักของแป้งจากกล้วยดิบทั้ง 8 สายพันธุ์ คือ สตาร์ช ซึ่งปริมาณสตาร์ชในสายพันธุ์จาก AA group และ AAB group จะมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับปริมาณสตาร์ชที่วิเคราะห์โดย Lii *et al.* (1982) ส่วน

ปริมาณสตาร์ชในสายพันธุ์จาก AAA group พบว่า มีค่ามากกว่าในสายพันธุ์อื่น ๆ และสายพันธุ์จากประเทศได้หวั่นอย่างชัดเจน

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งกล้วย (banana flour) จากกล้วย 8 สายพันธุ์

(หน่วย: ร้อยละ)

สายพันธุ์	โปรตีน	น้ำ	ไขมัน	เถ้า	สตาร์ช	เส้นใยที่ละลายน้ำได้	เส้นใยที่ไม่ละลายน้ำ
(N×6.25)							
AA group							
Oura da mata	2.80	4.69	0.33	2.60	65.7	2.10	6.85
AAA group							
Nanica	2.80	6.17	0.78	3.50	76.5	2.39	5.37
Nanicao7	2.60	4.17	0.82	3.00	76.1	2.18	4.10
AAB group							
Prata ana	2.90	4.97	0.47	2.90	68.2	2.31	6.55
Mysore	2.60	4.92	0.42	3.20	61.3	2.98	12.56
Maca	3.30	3.91	0.52	2.70	64.9	2.42	8.86
Prata comun	2.50	5.58	0.58	2.80	72.4	3.05	7.41

ที่มา: Mota *et al.* (2000)

4. การสกัดสตาร์ชจากกล้วยดิบ

กล้วยดิบ มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก จึงมีนักวิจัยหลายท่านสนใจสกัดสตาร์ชจากกล้วยดิบ ซึ่งสามารถทำได้ทั้งในระดับห้องปฏิบัติการ และระดับทางการค้า การสกัดสตาร์ชจากผลกล้วยดิบในระดับห้องปฏิบัติการสามารถทำได้อีกหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะให้ปริมาณสตาร์ช, ความบริสุทธิ์ของสตาร์ช, องค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ, สี และสมบัติทางฟิสิกส์ และสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ แตกต่างกัน

Kayisu *et al.* (1981) ทำการสกัดสตาร์ชจากผลกล้วยดิบและผลกล้วยสุก ซึ่งใช้การแช่เยือกแข็งกล้วยดิบ แล้วนำมาอบแห้ง บดเพื่อทำให้เป็นแป้งกล้วย และทำการสกัดสตาร์ชโดยอาศัยหลักการตกตะกอน และการหมุนเหวี่ยงเพื่อกำจัดสิ่งที่ไม่บริสุทธิ์ออกไป การสกัดสตาร์ชกล้วยตาม

วิธีนี้จะให้ปริมาณผลผลิต (% yield) ประมาณร้อยละ 40-50 ของแป้งกล้วย ความบริสุทธิ์ของ
สตาร์ชที่ได้ประมาณร้อยละ 99.5

Lii *et al.* (1982) ทำการสกัดสตาร์ชจากกล้วยดิบซึ่งเป็นพันธุ์จากประเทศไต้หวัน โดยใช้
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.05 นอร์แมล บดเนื้อกล้วยกับสารละลายที่ความเร็ว
ต่ำ เวลา 2 นาที กรองด้วยผ้าเนื้อหยาบและเนื้อละเอียด สตาร์ชจากส่วนที่กรองได้จะตกตะกอน ล้าง
สตาร์ชหลาย ๆ ครั้งด้วยน้ำกลั่น จนสารละลายด้านบนไม่มีสี ทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40
องศาเซลเซียส

Bello-Perez *et al.* (1998) ได้ทำการสกัดสตาร์ชจากกล้วยดิบโดยนำเนื้อกล้วยดิบที่หั่นแล้ว
500 กรัม แช่ในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ความเข้มข้น 1.22 กรัมต่อลิตร ปริมาณ 500 กรัม บดเนื้อ
กล้วยกับสารละลายแล้วกรองผ่านตะแกรงเพื่อทำความสะอาด นำไปหมუნเหวี่ยง สตาร์ชที่
ตกตะกอนด้านล่างอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง นำมาบด ร่อนผ่านตะแกรงขนาด
100 เมช

Whistler (1998) ทำการสกัดสตาร์ชจากกล้วยและได้ทำการจดสิทธิบัตรวิธีการสกัดสตาร์ช
จากกล้วยโดยใช้สารละลายโซเดียมไบซัลไฟด์และเอนไซม์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติในกล้วย ซึ่ง
สามารถช่วยให้สกัดสตาร์ช กล้วยได้ง่ายขึ้น โดยนำเนื้อกล้วยดิบบดผสมกับสารละลายโซเดียมไบ
ซัลไฟด์เข้มข้นร้อยละ 0.5-3.0 (w/w) ซึ่งมีค่า pH 3.0-5.0 ที่อุณหภูมิ 20-50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา
2-8 ชั่วโมง กรอง นำส่วนที่กรองได้ไปหมუნเหวี่ยง สตาร์ชที่ตกตะกอน นำไปอบแห้ง วิธีการสกัดนี้
จะได้ปริมาณผลผลิตสูง

Fichtali *et al.* (1999) คิดค้นและจดสิทธิบัตรวิธีการสกัดสตาร์ชกล้วยในระดับทางการค้า
โดยบดกล้วยที่ยังไม่ปอกเปลือกกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่ำกว่า 0.15 นอร์
แมล ในอัตราส่วนกล้วยต่อสารละลายเป็น 1:2 ถึง 1:4 ทิ้งไว้อย่างน้อย 1 ชั่วโมง กรองแยกกากด้วย
ตะแกรงขนาด 30-400 เมช ล้างสตาร์ชซ้ำ 2-6 ครั้ง นำสตาร์ชที่กรองได้ไปหมუნเหวี่ยง นำไปทำแห้ง
ได้สตาร์ชที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 95 มีปริมาณโปรตีนน้อยกว่าร้อยละ 1 ปริมาณเถ้า
น้อยกว่าร้อยละ 0.07

วสันต์ (2543) ได้ศึกษา โดยทำการสกัดสสารจากกล้วยสายพันธุ์ไทย ได้แก่ กล้วยน้ำว้า ค่อม, กล้วยหักมุก และกล้วยตานี จากนั้นเปรียบเทียบความสามารถในการสกัดสสารของสารสามชนิดได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์, สารละลายโซเดียมโบรไมด์ และซึ่งพบว่าผลผลิตของสสารที่อยู่ในช่วงร้อยละ 11-34 มีปริมาณโปรตีนร้อยละ 0.25-1.73 มีดัชนีความขาวอยู่ในช่วงร้อยละ 84.41-96.26 ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และสารละลายที่ใช้ พบว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 นอร์มัล เป็นสารละลายที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดสสารจากกล้วยเพื่อศึกษาสมบัติต่าง ๆ

สตาร์ช

สตาร์ชเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่สำคัญในพืช (Singh *et al*, 2003) และเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 ($C_6H_{10}O_5$)_n โมเลกุลประกอบด้วยพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส (anhydroglucose unit) และ เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคสิดิก (glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางตอนปลายของสายพอลิเมอร์มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group) ที่เป็นหมู่รีดิวซ์ (reducing group) โดยทั่วไปสตาร์ชประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น ที่เรียกว่า แอมีโลส (amylose) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง ที่เรียกว่า แอมีโลเพกทิน (amylopectin) สตาร์ชจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของแอมีโลส และแอมีโลเพกทินแตกต่างกัน ทำให้สมบัติของสตาร์ชแต่ละชนิดแตกต่างกัน (กล้านรงค์ และเกื้อกุล, 2546)

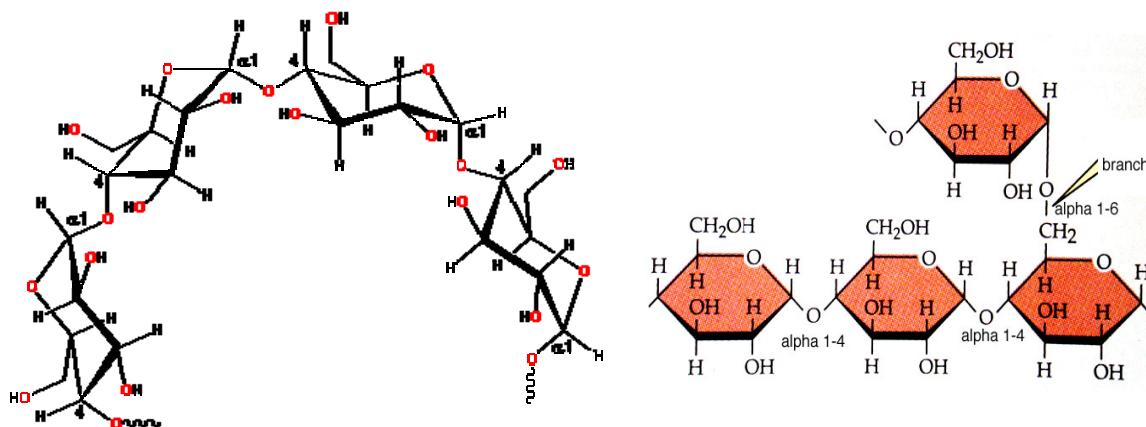
1. องค์ประกอบหลักของสตาร์ช

1.1 แอมีโลส

เป็นพอลิเมอร์สายตรง เกิดจากกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ (1→4) ซึ่งเชื่อมหน่วยของแอลฟา-ดี-กลูโคไพราโนซิล (α -D-glucopyranosyl unit) ประมาณ 2,000 หน่วย ซึ่งในปัจจุบันพบว่าแอมีโลสยังประกอบไปด้วย พอลิเมอร์ที่เป็นกิ่งแขนงที่เชื่อมด้วยพันธะ (1→6) ((1→6)- α -linkages) บ้างเล็กน้อย (Buléon *et al.*, 1998) จำนวนกิ่งแขนงมีกลูโคสประมาณ 2-11 หน่วยกลูโคส แตกต่างกันไปตามชนิดและแหล่งที่มาของสตาร์ช (Donovan, 1979) นอกจากนี้ตำแหน่งของแอมีโลสภายในเม็ดสตาร์ชยังขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของสตาร์ชด้วยเช่นกัน โดยสาเหตุที่สตาร์ชมีปริมาณของแอมีโลสต่างกันนั้เนื่องมาจากกิจกรรมของเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ในการ

สังเคราะห์สสาร เช่น กลุ่มเอนไซม์สังเคราะห์ซินเทส (starch synthase) (Singh *et al.*, 2003)

โครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลส แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 โครงสร้างของแอมิโลส

ที่มา : <http://www.lsbu.ac.uk/water/hysta.html>

<http://academic.brooklyn.cuny.edu/biology/bio4fv/page/starch.html>

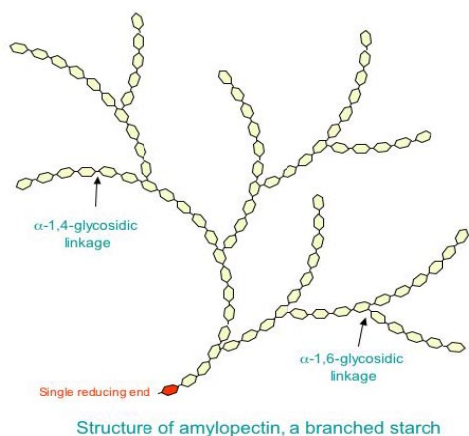
แอมิโลสเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดโมเลกุลของแอมิโลเพกทิน โดยมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ $10^5 - 10^6$ (Buléon *et al.*, 1998; Whistler and BeMiller, 1999; Tester *et al.*, 2004) มีขนาดโมเลกุล หรือระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์เฉลี่ย (degree of polymerization, $\overline{DP}_n$) 700-5,000 และมีค่าเฉลี่ยของความยาวของสายโมเลกุล (average chain length, $\overline{CL}_n$) 100-550 ซึ่งแอมิโลสในสสารจากพืชแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุล ขนาดโมเลกุล และความยาวของสายโมเลกุลที่แตกต่างกันไป (Hizukuri, 1996) โครงสร้างแอมิโลสสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน ได้เป็นสารที่มีสีน้ำเงิน (Williams, 1968) นอกจากนี้ยังสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ เช่น บิวทานอล กรดไขมัน สารลดแรงตึงผิว ฟีนอล และไฮโดรคาร์บอน (กล้านรงค์ และเกื้อกูล, 2546)

1.2 แอมิโลเพกทิน

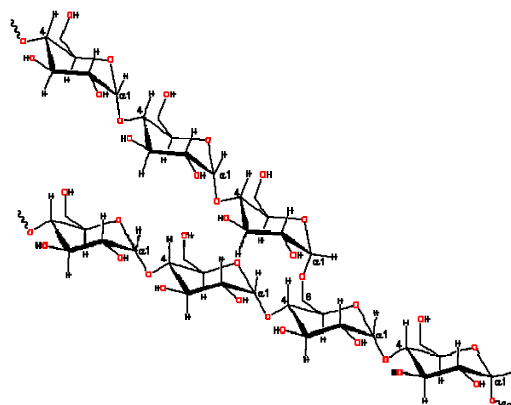
เป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่มีกิ่งก้านขนาดใหญ่ เชื่อมต่อระหว่างสายของ แอลฟา-ดี-กลูโคไพราโนซิด ด้วยพันธะหลักคือ (1→4) และพันธะรองคือ (1→6) ที่ตำแหน่งจุดเชื่อมกิ่ง ซึ่งพันธะรองนี้มีอยู่ประมาณร้อยละ 5-6 ของปริมาณหน่วยกลูโคสในแอมิโลเพกทินทั้งหมด (Buléon *et al.*, 1998) โมเลกุลของแอมิโลเพกทินเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 10^7 - 10^9 ประกอบขึ้นจากสายโซ่หลักสายหนึ่ง เรียกว่า C chain ซึ่งจะมี reducing end อยู่หนึ่งหมู่ มีสายกิ่งก้านมาต่ออีก 2 สาย หรือมากกว่าเรียกสายกิ่งเหล่านี้ว่า B chain โดยสายกิ่งนี้จะมีสาย A chain เข้ามายึดจับซึ่งเป็นสายที่ไม่มีกิ่งเชื่อมอีกแล้ว (Whistler and BeMiller, 1999) ในแอมิโลเพกทินแต่ละโมเลกุลประกอบด้วยสาย C เพียงหนึ่งสายเท่านั้น นอกจากนี้สาย B ยังแบ่งออกเป็น B1-B4 ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนคลัสเตอร์ (cluster) (Tester, 1997) ขนาดโมเลกุลของแอมิโลเพกทินมีตั้งแต่ขนาดเล็ก จนถึงขนาดใหญ่ซึ่งอยู่รวมกันเป็นคลัสเตอร์ โดยลักษณะสาย A และสาย B1 จะประกอบเป็นคลัสเตอร์เดี่ยว สำหรับสาย B2 และสาย B3 มีความยาวของสายแผ่ออกไป และมีโครงสร้างที่ประกอบด้วย 2 และ 3 คลัสเตอร์ โดยสาย A และ B1- B4 จะมีขนาดความยาวของสาย (CLn) อยู่ในช่วง 12-16, 20-24, 42-48, 69-75 และ 101-119 ตามลำดับ (Tester *et al.*, 2004) แต่อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนของ B chain จะต้องประกอบด้วยสาย A chain มากกว่าหนึ่งสายเสมอ (Buléon *et al.*, 1998) โดยมีอัตราส่วนระหว่าง A chain : B chain ระหว่าง 1:1 ถึง 2:1 (Molar basis) หรือ 0.5:1 ถึง 1:1 (weight basis) (Tester *et al.*, 2004) โครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลเพกทิน และคลัสเตอร์ของสายแอมิโลเพกทิน แสดงดังภาพที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

1.3 โครงสร้าง และการรวมตัวเป็นเม็ดสตาร์ช

โดยธรรมชาติทั่วไป สตาร์ชคือแหล่งเก็บสะสมอาหารของพืชที่สามารถสังเคราะห์แสง ซึ่งจะพบทั่วไปในรูปแบบที่เป็นเม็ดสตาร์ช (starch granule) การจัดเรียงตัวของโมเลกุลในเม็ดสตาร์ชลักษณะที่แตกต่างกัน จะทำให้เม็ดสตาร์ชมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งโครงร่างผลึก (quasicrystalline หรือ semicrystalline) ค่อนข้างมีความหนาแน่น และคงตัว (Singh *et al.*, 2003; French, 1984) โมเลกุลที่ทำให้เกิดลักษณะเช่นนี้ คือ แอมิโลส และแอมิโลเพกทิน



(ก)

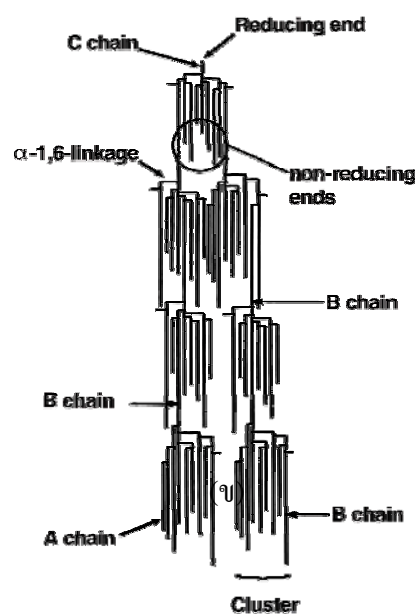
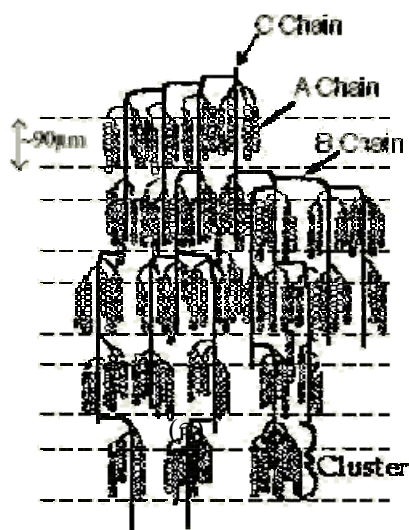


(ข)

ภาพที่ 4 โครงสร้างของแอมิโลเพกทิน

ที่มา : (ก) <http://www.langara.bc.ca/biology/mario/Assets/Amylopectin.jpg>

(ข) <http://www.lsbu.ac.uk/water/hysta.html>



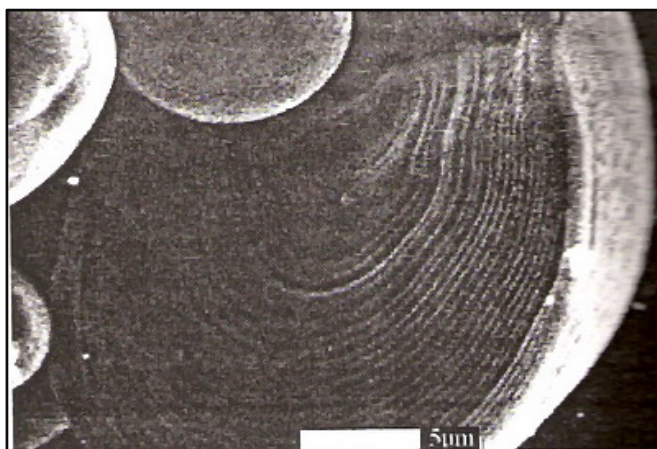
ภาพที่ 5 ลักษณะคลัสเตอร์ (cluster) ของแอมิโลเพกทิน ที่ประกอบไปด้วย A, B, และ C chain

ที่มา: (ก) <http://www.jic.bbsrc.ac.uk/staff/cliff-hedley/graphics/cluster.gif>

(ข) <http://www.herbario.com.br/cie/universi/teoria/oqueamid.htm>

โครงสร้างกิ่งผลึกของสสารประกอบไปด้วยส่วนอสัณฐาน (amorphous region) และส่วนของโครงร่างผลึก (crystalline region) ทั้งสองส่วนจะนี้มีการจัดเรียงตัวซ้อนกันเป็นชั้น ในแนวรัศมีของเม็ดสสาร (Donovan, 1979) และเริ่มจากจุดศูนย์กลางของเม็ดสสาร หรือที่เรียกว่าไฮลัม (hilum) (Whistler and BeMiller, 1999) ทุก ๆ ชั้นจะเป็นส่วนของอสัณฐาน และโครงร่างผลึกสลับกัน (Vandeputte *et al.*, 2003a) ซึ่งการเรียงสลับชั้นนี้จะทำให้เกิดลักษณะเป็นวงแหวน หรือเรียกว่า growth ring ดังภาพที่ 6

การตรวจสอบลักษณะวงแหวน หรือเรียกว่าวงอายุของเม็ดสสาร สามารถศึกษาได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงปกติ (light microscope) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบแสงส่องกราด (Scanning Electron Microscope) (Tester, 1997) ในเม็ดสสารที่มีขนาดใหญ่ เช่นมันฝรั่ง สามารถเห็นวงแหวนได้ เมื่อสสารเกิดการพองตัว แต่ที่สภาวะที่เม็ดสสารแห้ง วงอายุปรากฏไม่ชัดเจน



ภาพที่ 6 วงแหวน (growth ring) ของเม็ดสสารจากมันฝรั่ง ที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน
ที่มา: Donald (2006)

ส่วนอสัณฐานเป็นส่วนที่มีการจัดเรียงโมเลกุลไม่หนาแน่น และไม่เป็นระเบียบ (Phillips and Williams, 2000) ประกอบไปด้วยจุดเชื่อมกิ่ง (branch point) ของโมเลกุลแอมิโลเพกทิน และโมเลกุลแอมิโลส (Singh *et al.*, 2003) ในสสารที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลาง และแอมิโลสต่ำ จะมีโครงร่างผลึกที่เสถียร เนื่องจากสายกิ่งแขนงของแอมิโลเพกทินเกิดการพันกันเป็นเกลียวคู่ด้วยพันธะไฮโดรเจน และส่วนของความเป็นผลึกของเม็ดสสารจะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อมี

การรวมตัว หรือจับตัวกันของโครงร่างผลึกมากขึ้น (Tester, 1997) นอกจากนี้ ความเป็นผลึกของเม็ดสตาร์ชเพิ่มขึ้นเมื่อเอมิโลเพกทินที่เพิ่มขึ้น (Singh *et al.*, 2003; Yuan *et al.*, 1993) และความเป็นผลึกของสตาร์ชมีค่าแตกต่างกันในสตาร์ชต่างชนิดกัน หรือต่างพันธุ์กัน แต่โมเลกุลของเอมิโลส สามารถเกิดอันตรกิริยา (interaction) กันจนเกิดเป็นโครงร่างผลึกได้เช่นกัน แต่จะให้ความเป็นผลึกน้อยกว่าเอมิโลเพกทิน (Vandeputte *et al.*, 2003b) ซึ่ง Tester (1997) พบว่า ในสตาร์ชที่มีปริมาณเอมิโลสปานกลาง โมเลกุลเอมิโลสจะอยู่ในส่วนอสัณฐาน และสตาร์ชที่มีปริมาณเอมิโลสสูง โมเลกุลอาจสามารถพันกันจนเกิดเป็นโครงร่างผลึกได้

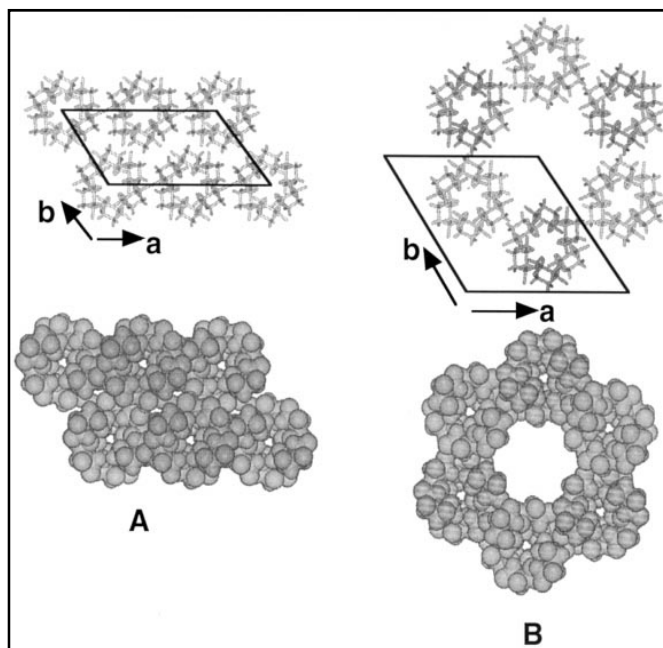
โมเลกุลของสตาร์ชสามารถจัดเรียงตัวเป็นเกลียวคู่ได้ โดยจะเกิดใน 2 ลักษณะ คือ โครงสร้างแบบ A และโครงสร้างแบบ B ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัว (parallel หรือ antiparallel) ในหน่วยเซลล์ (unit cell) และการพันของเกลียวคู่ โดยพิจารณาทิศทางของที่พันของเกลียวคู่ (left-handed หรือ right-handed) เกลียวคู่แบบ A มีการอัดตัว และจัดเรียงตัวของโมเลกุลในหน่วยเซลล์เป็นแบบ monoclinic และมีโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ระหว่างสายของเกลียวคู่จำนวน 8 โมเลกุล ต่อหนึ่งหน่วยเซลล์ ส่วนโครงสร้างแบบ B เป็นเกลียวคู่ที่มีการอัดตัว และจัดเรียงตัวของโมเลกุลในหน่วยเซลล์เป็นแบบ hexagonal ช่องว่างระหว่างกลางของโมเลกุลที่ล้อมรอบไปด้วยเกลียวคู่ 6 สายในโครงสร้างแบบ B จะมีโมเลกุลน้ำจำนวน 36 โมเลกุล นอกจากนี้ repeated unit ของโครงสร้างแบบ A คือ หน่วยของมอลโทโทรโอซิล (maltotriosyl) ส่วน repeated unit ของโครงสร้างแบบ B คือ มอลโทซิล (maltosyl) (Buléon *et al.*, 1998; Sajilata *et al.*, 2006) รูปแบบโครงสร้างเกลียวคู่ของโมเลกุลสตาร์ชแบบ A และ B แสดงดังภาพที่ 7

2. สมบัติของแป้งและสตาร์ชจากกล้วย

2.1 สมบัติทางกายภาพ

การสังเกตลักษณะเม็ดสตาร์ชสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ ซึ่งเป็นวิธีที่รวดเร็วและง่าย แต่ผู้ที่ทำการตรวจสอบต้องมีความชำนาญในการสังเกตลักษณะต่าง ๆ โดยทั่วไปลักษณะที่ทำการสังเกต คือ รูปร่าง ขนาด ตำแหน่งของไฮลัม การกระจายตัวของขนาดเม็ดสตาร์ช และลักษณะไบรีฟรินเจนท์ ซึ่งเป็นสมบัติหนึ่งของสตาร์ชที่สามารถเบี่ยงเบนระนาบของแสงโพลาไรซ์ได้ และมีการตัดกันของแขนที่เรียกว่ากากบาท (maltese cross)

หรือไบรีฟรินเจนต์ (birefringence) ซึ่งจะตัดกันที่ตำแหน่งของไฮลัม (Whistler and BeMiller, 1999)



ภาพที่ 7 การจัดเรียงโมเลกุลของสตาร์ชแบบเกลียวคู่ของโครงสร้างแบบ A และโครงสร้างแบบ B บนแนวระนาบ a และ b

ที่มา: Buléon *et al.* (1998)

Lii *et al.* (1982) พบว่าลักษณะของเม็ดสตาร์ชจากกล้วยพันธุ์จากประเทศไต้หวัน ที่ตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ เมื่อส่องดูภายใต้แสงปกติพบว่าเม็ดสตาร์ชจากกล้วยที่ระยะการสุกต่าง ๆ จะมีรูปร่างหลายลักษณะ มีรูปร่างไม่แน่นอน อีกทั้งยังมีหลายขนาด ขนาดที่พบมากที่สุดอยู่ในช่วง 20-60 ไมโครเมตร (μm) ลักษณะเม็ดสตาร์ชจากกล้วยพันธุ์จากประเทศไต้หวันแสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ลักษณะเม็ดสสารชกกล้วยพันธุ์จากประเทศไต้หวันที่ตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์
แสงปกติ ที่กำลังขยาย 40 เท่า

ที่มา : Lii *et al.* (1982)

วสันต์ (2543) ได้ทำการตรวจสอบขนาดอนุภาคของเม็ดสสารชโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ (Laser particle size analyzer) ซึ่งสามารถแสดงลักษณะการกระจายตัวของเม็ด สสารชของกล้วยพันธุ์จากประเทศไทย 3 สายพันธุ์ คือ กล้วยน้ำว้าค่อม กล้วยหักมุก และกล้วยตานี และสามารถวัดขนาดของเม็ดสสารชได้ โดย กล้วยน้ำว้าค่อมมีขนาดเม็ดสสารชอยู่ในช่วง 15.23-55.07 ไมโครเมตร กล้วยหักมุกมีขนาดอยู่ในช่วง 13.20-66.71 ไมโครเมตร ส่วนกล้วยตานีมีขนาดอยู่ในช่วง 7.93-24.63 ไมโครเมตร และขนาดเม็ดสสารชที่มีมากที่สุดในแต่ละสายพันธุ์ คือ 30.12, 30.18 และ 15.23 ไมโครเมตร ตามลำดับ รูปร่างเม็ดสสารชจากกล้วยน้ำว้าค่อม มีรูปร่างคล้ายเปลือกหอย สสารชจากกล้วยหักมุกมีรูปร่างเป็นแท่ง แท่งยาวรี ส่วนกล้วยตานีเม็ดสสารชมีลักษณะแตกต่างกันทั้งขนาด และรูปร่าง ซึ่งมีทั้งลักษณะคล้ายเปลือกหอย มีลักษณะเป็นแท่ง

สังเกตได้ว่า ถึงแม้ว่าเป็นสสารชจากกล้วยเหมือนกัน แต่เป็นกล้วยที่มีสายพันธุ์ต่างกัน อีกทั้งยังมีระยะการสุกของผลไม่เท่ากัน จะมีผลทำให้ขนาด รูปร่างเม็ดสสารชที่สังเกตได้มีความแตกต่างกันด้วย ดังแสดงขนาดเม็ดสสารชจากกล้วยสายพันธุ์ที่ใช้ในงานวิจัยต่าง ๆ ดังตารางที่ 4 นอกจากนี้เม็ดสสารชที่มาจากแหล่งของสสารชต่างกันก็จะมีลักษณะรูปร่างและขนาดต่างกันด้วย ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ขนาดเมล็ดสตาร์ชจากกล้วยสายพันธุ์ที่ใช้ในงานวิจัยต่าง ๆ

พันธุ์	ขนาดเมล็ดสตาร์ช(μm)	แหล่งงานวิจัย
Valery (AAA)	15-50	Kayisu <i>et al.</i> (1981)
Taiwan dessert banana (ABB)	20-60	Lii <i>et al.</i> (1982)
Fougamou (ABB)	7.2-76.4	Eggleston (1992)
Bluggoe(ABB)	3.9-50.8	Eggleston (1992)

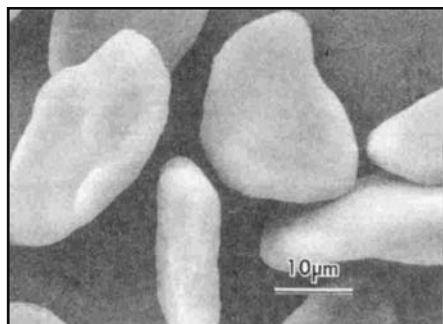
นอกจากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาแล้ว ยังมีการใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดลำแสงอิเล็กตรอนแบบแสงส่องกราด หรือ scanning electron microscope (SEM) เพื่อสำหรับศึกษาโครงสร้างของพื้นผิวเมล็ดสตาร์ชอย่างละเอียด

ตารางที่ 5 ขนาดและรูปร่างของเมล็ดสตาร์ชชนิดต่าง ๆ

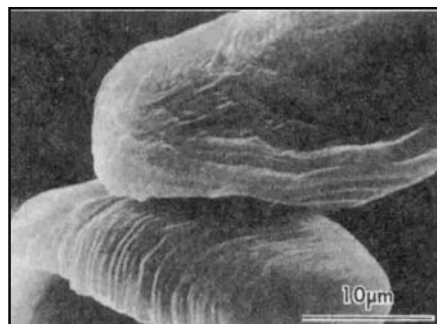
แหล่งของสตาร์ช	ขนาดเม็ด (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)	รูปร่างเมล็ดสตาร์ช
กล้วย	6-80	20-60	หลายเหลี่ยม รูปไข่ เปลือกหอย
มันฝรั่ง	5-100	30	กลม รูปไข่มีวงคล้ายเปลือกหอย
ข้าวโพด	3-26	15	กลมแบน มีหลายเหลี่ยม คล้ายแท่ง
ข้าวสาลี	1-40	10	กลมค่อนข้างรี
มันสำปะหลัง	4-35	20	กลม คล้ายไข่ที่มีรอยตัด
ถั่วเขียว	7-26	11	รูปไข่ คล้ายเม็ดถั่ว

ที่มา: ดัดแปลงจาก Ellis *et al.* (1998), Hoover *et al.* (1997) และ Lii *et al.* (1982)

Kayisu *et al.* (1981) ศึกษาโครงสร้างพื้นผิวของเมล็ดสตาร์ชจากกล้วยสุก และสตาร์ชจากกล้วยดิบสายพันธุ์ Valery (AAA group) พบว่าลักษณะผิวของเมล็ดสตาร์ชกล้วยดิบจะมีลักษณะเรียบ ส่วนผิวของสตาร์ชจากกล้วยสุกจะสังเกตลักษณะเป็นรอยขนานกันบนพื้นผิว ซึ่งเป็นผลมาจากการทำงานของเอนไซม์แอมิเลส (amylase) ระหว่างขบวนการสุก ดังภาพที่ 9ก และ 9ข



(ก)



(ข)

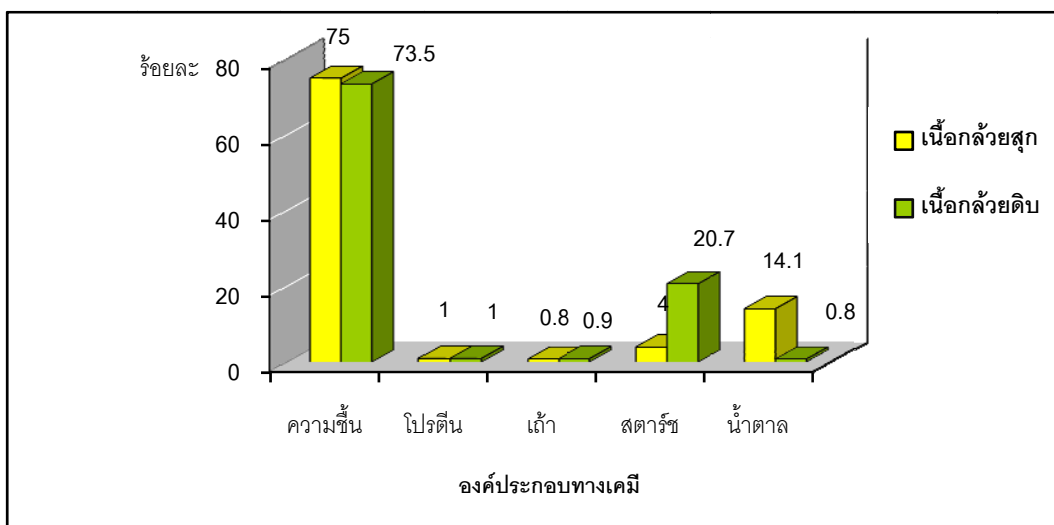
ภาพที่ 9 ลักษณะเมื่อดูดซับจากกัลยาดิบ (ก) และเมื่อดูดซับจากกัลยาดิบ (ข) ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสงส่องกราด (SEM)

ที่มา : Kayisu *et al.* (1981)

2.2 สมบัติทางเคมี

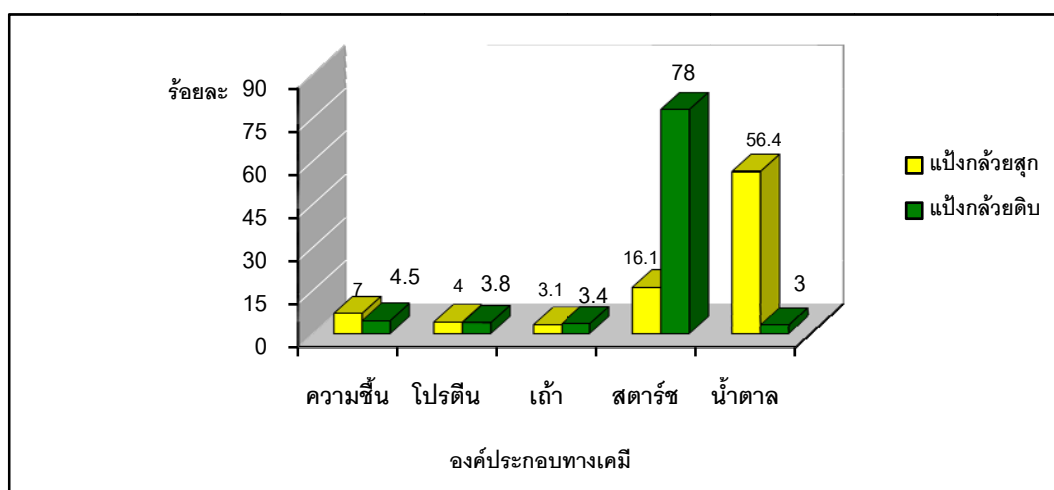
สารแต่ละชนิด ถึงแม้จะเป็นสารจากพืชชนิดเดียวกัน แต่หากมีความแตกต่างของสายพันธุ์ แหล่งเพาะปลูก อายุการเก็บเกี่ยว วิธีการสกัดสาร รวมถึงเทคนิคและสารเคมีที่ใช้ สารจะให้สมบัติที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้นจึงพบว่า สารจากกัลยาดิบที่สกัดได้จากแหล่งงานวิจัยต่าง ๆ จะมีค่าทางองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันเคมีแตกต่างกัน (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2546)

Kaysu *et al.* (1981) ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อกัลยาดิบและเนื้อกัลยาดิบ ซึ่งพบว่าทั้งเนื้อกัลยาดิบ และเนื้อกัลยาดิบจะมีปริมาณความชื้นอยู่มากถึงร้อยละ 75.0 และร้อยละ 73.5 ตามลำดับ แต่เนื้อกัลยาดิบจะมีปริมาณสารมากกว่าเนื้อกัลยาดิบ ในขณะที่เนื้อกัลยาดิบจะมีปริมาณน้ำตาลมากกว่าเนื้อกัลยาดิบ ดังภาพที่ 10 จากนั้นจึงศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของแป้งกัลยาดิบที่ได้จากเนื้อกัลยาดิบ และเนื้อกัลยาดิบดังกล่าว พบว่า ปริมาณความชื้น ปริมาณโปรตีน และปริมาณเถ้าไม่แตกต่างกันมากนักระหว่างแป้งจากกัลยาดิบกับแป้งจากกัลยาดิบ แต่พบว่า แป้งจากกัลยาดิบจะมีปริมาณน้ำตาลประมาณร้อยละ 56.4 ซึ่งมากกว่ากัลยาดิบ คือร้อยละ 3.0 ส่วนกัลยาดิบจะมีปริมาณสารมากกว่ากัลยาดิบ คือ มีร้อยละ 78.0 ซึ่งกัลยาดิบมีปริมาณสารเพียงร้อยละ 16.1 ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 10 แผนภูมิแสดงค่าองค์ประกอบทางเคมีเปรียบเทียบระหว่างเนื้อกล้วยสูง และเนื้อกล้วยดิบ

ที่มา: ดัดแปลงจาก Kayisu *et al.* (1981)

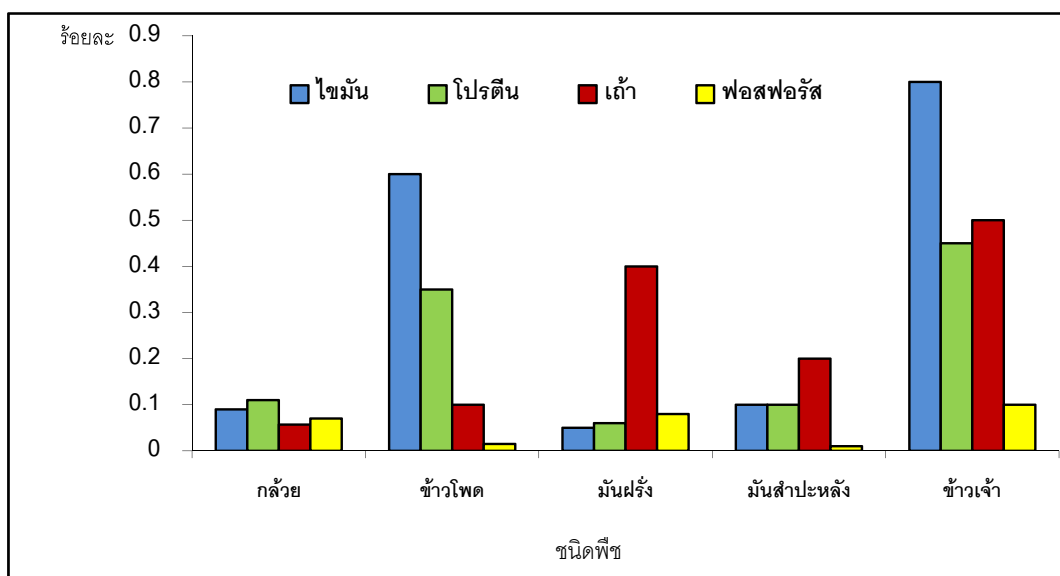


ภาพที่ 11 แผนภูมิแสดงค่าองค์ประกอบทางเคมีเปรียบเทียบระหว่างแป้งกล้วยสูง และแป้งกล้วยดิบ

ที่มา: ดัดแปลงจาก Kayisu *et al.* (1981)

เมื่อนำค่าองค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชกล้วยจากงานวิจัยของ Lii *et al.* (1982) มาเปรียบเทียบกับค่าขององค์ประกอบทางเคมีจากแหล่งสตาร์ชอื่น ๆ ได้แก่ ข้าวโพด มันฝรั่ง มันสำปะหลัง และข้าวเจ้า ซึ่งพบว่าองค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชจากกล้วยมีค่าใกล้เคียงกับองค์ประกอบทางเคมีของมันสำปะหลังมากที่สุด แต่โดยรวมแล้วองค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชจากกล้วยจะมีค่าต่ำกว่าแหล่งสตาร์ชอื่น ๆ ดังแสดงในภาพที่ 12

องค์ประกอบเคมีที่มีความสำคัญและเป็นปัจจัยสำคัญหนึ่งที่ทำให้สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของสตาร์ชมีความแตกต่างกัน นั่นคือ แอมิโลส ซึ่งกล้วยจะมีปริมาณแอมิโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 16.0-31.98 ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ ระยะการสุก และวิธีการวิเคราะห์ ส่วนแหล่งสตาร์ชอื่น ๆ เช่น สตาร์ชจากธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี และข้าวฟ่างจะมีปริมาณแอมิโลส ประมาณร้อยละ 28 ส่วนสตาร์ชจากพืชหัวและราก เช่น มันฝรั่ง มันสำปะหลัง และสาकु มีปริมาณแอมิโลสประมาณร้อยละ 20 (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2546)



ภาพที่ 12 แผนภูมิแสดงค่าองค์ประกอบทางเคมีเปรียบเทียบระหว่างสตาร์ชจากกล้วยกับสตาร์ชจากแหล่งอื่น ๆ

ที่มา: ดัดแปลงจาก กล้าณรงค์ และเกื้อกูล (2546); Lii *et al.* (1982)

2.3 สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์

สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ที่สำคัญของสตาร์ช ได้แก่ ความสามารถในการพองตัว และการละลาย การเกิดเจลในเซชัน สมบัติเชิงความร้อน สมบัติด้านความหนืด ซึ่งสามารถกล่าวได้ดังนี้

เมื่อผสมน้ำกับสตาร์ชเข้าด้วยกัน พบว่า น้ำหรือของเหลวชนิดอื่นสามารถแพร่และผ่านเข้าไปในร่างแหไมเซล (micelle) ในเม็ดสตาร์ชได้อย่างอิสระ สตาร์ชดิบจะไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลลิ่งในน้ำ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ชที่อยู่ใกล้ ๆ กัน แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัว ทำให้การละลาย ความหนืด และความใสเพิ่มขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการพองตัว และความสามารถในการละลาย คือ ชนิดสตาร์ช ปริมาณน้ำในสารละลายสตาร์ช (กลั่นรงค์ และเกื้อกูล, 2546) ปริมาณแอมิโลส และแอมิโลเพกทิน องค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ เช่น ไขมัน โดยไขมันจะสามารถยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ชได้ โดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลของแอมิโลส (Tester and Morrison, 1990) โครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลเพกทิน ซึ่งรวมไปถึง ความยาวของสาย รูปร่าง และน้ำหนักโมเลกุลของแอมิโลเพกทิน (Tester, 1997) รูปแบบในการพองตัว และการละลายของเม็ดสตาร์ชจากพืชแต่ละชนิด จะมีรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป (กลั่นรงค์ และเกื้อกูล, 2546)

สตาร์ชจากธัญพืชจะมีรูปแบบการพองตัวและการละลาย 2 ชั้น แสดงถึงแรงของพันธะภายในเม็ดสตาร์ชที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ พันธะบริเวณผลึก และบริเวณอสัณฐานของสตาร์ช สตาร์ชจำพวกนี้มีจำนวนพันธะสูงสุด แต่มีกำลังการพองตัวและการละลายต่ำสุดเนื่องจากมีปริมาณแอมิโลสสูง ซึ่งแอมิโลสจะทำให้โครงสร้างที่เป็นร่างแห หรือโครงสร้างผลึกในเม็ดสตาร์ชแข็งแรงขึ้น ทำให้พองตัวได้ต่ำ สตาร์ชจากส่วนราก เช่น มันสำปะหลัง มีการพองตัวเพียงชั้นเดียว กำลังการพองตัวและการละลายมีค่าสูงกว่าสตาร์ชจากธัญพืช เนื่องจากมีจำนวนพันธะน้อยกว่า สตาร์ชจากส่วนรากจะเกิดเจลลิ่งในน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าสตาร์ชจากธัญพืช สำหรับสตาร์ชจากพืชหัว เช่น สตาร์ชจากมันฝรั่ง จะมีการพองตัวสูงเนื่องจากพันธะภายในร่างแหอ่อนแอ นอกจากนี้หมู่ฟอสเฟตภายในสตาร์ชมันฝรั่งยังทำให้เกิดการพองตัวสูงขึ้น เนื่องจากสามารถก่อให้เกิดแรงผลักระหว่างไฟฟ้าได้ การพองตัวในแป้งจากส่วนหัวจะเกิดเพียงชั้นเดียว และเกิดที่อุณหภูมิต่ำ (กลั่นรงค์ และเกื้อกูล, 2546)

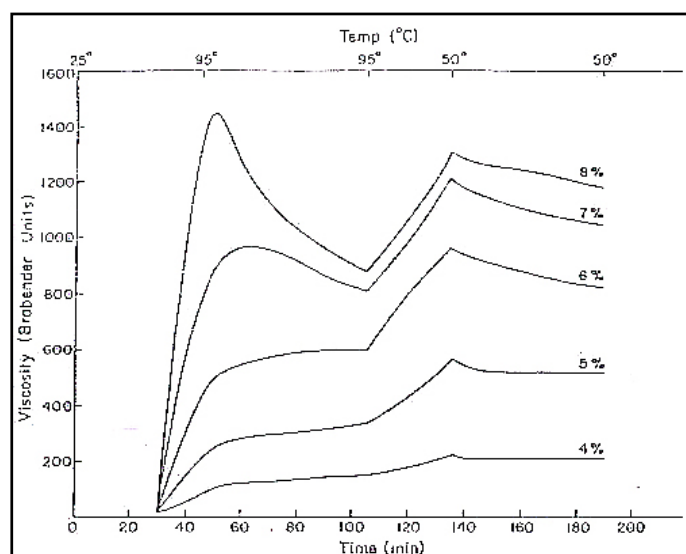
หลังจากที่มีการให้ความร้อนแก่สารละลายสตาร์ช และพันธะไฮโดรเจนคลายตัวลงแล้ว โมเลกุลของน้ำจะสามารถแพร่เข้าไปในเม็ดสตาร์ชได้ เม็ดสตาร์ชจึงเกิดการพองตัว (กล้านรงค์ และเกื้อกูล, 2546) เมื่อโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ชยังคงถูกรบกวนจากความร้อน และโมเลกุลของน้ำ จะเกิดการสูญเสียโครงสร้าง และเกิดการพองตัวแบบไม่สามารถฟื้นกลับได้นอกจากนี้คุณสมบัติการเกิดไบรีฟรินเจนท์จะหมดไป และสูญเสียโครงสร้างผลึกในที่สุดปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า การเกิดเจลาทิไนเซชัน (gelatinization) (Whistler and BeMiller, 1999) ซึ่งในขณะที่เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวแบบไม่สามารถฟื้นกลับได้นั้น โมเลกุลของน้ำอิสระที่อยู่รอบ ๆ เม็ดสตาร์ชเหลือน้อยลง เม็ดสตาร์ชเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืดขึ้น ความหนืดของสตาร์ช สามารถตรวจสอบและติดตามได้ด้วยเครื่องวัดความหนืดอย่างรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, RVA) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ได้รับความนิยมในการตรวจสอบความหนืดของแป้ง และสตาร์ช เนื่องจากใช้เวลาในการตรวจสอบสั้น ๆ และใช้ปริมาณตัวอย่างน้อย หลักการตรวจสอบด้วยเครื่องอาร์วีเอ คือ ติดตามการเปลี่ยนแปลงความหนืดของตัวอย่าง ขณะที่มีการทำให้สารละลายตัวอย่างร้อน และทำให้เย็น โดยมีการกวนของใบพัดร่วมด้วย (กล้านรงค์และเกื้อกูล, 2546) ผลการตรวจสอบ แสดงเป็นกราฟความหนืด ที่แสดงค่าความความหนืดของตัวอย่างที่อุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ

ในขณะที่เกิดกระบวนการเจลาทิไนเซชัน โมเลกุลของเอมิโลสสามารถแพร่ออกมานอกเม็ดสตาร์ชได้ แต่อย่างไรก็ตาม การแพร่ออกของโมเลกุลเอมิโลส สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาทิไนเซชัน เนื่องจาก โมเลกุลของเอมิโลสเหล่านั้น เป็นโมเลกุลที่เป็นสายสั้น ๆ และไม่ได้อยู่ในส่วนของโครงสร้างผลึก จึงสามารถแพร่ออกมาได้ก่อน นอกจากนี้อุณหภูมิการเกิดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ชจะเกิดในลักษณะเป็นช่วง โดยเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่จะสามารถเกิดเจลาทิไนซ์ได้ก่อนเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก อุณหภูมิปรากฏของการเกิดเจลาทิไนเซชัน และช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลาทิไนเซชันของแต่ละตัวอย่างจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้ตรวจสอบ อัตราส่วนระหว่างสตาร์ชกับน้ำ ชนิดและลักษณะของเม็ดสตาร์ช (Whistler and BeMiller, 1999)

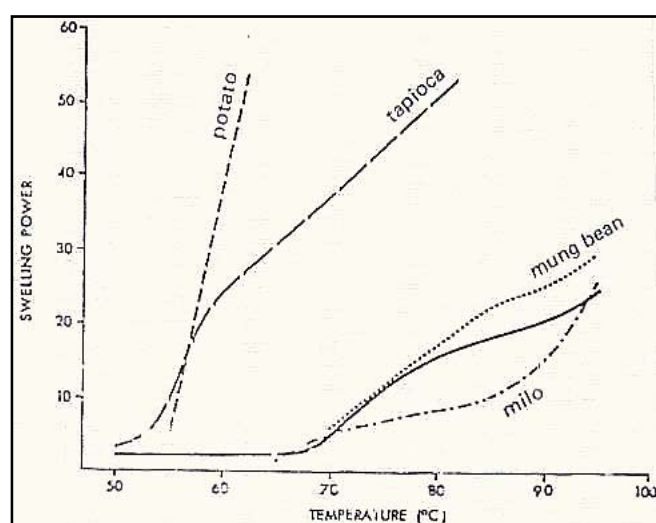
จากงานวิจัยของ Kayisu *et al.* (1981) พบว่าลักษณะกราฟความหนืดของสตาร์ชจากกล้วยจะมีลักษณะแบบผสม โดยมีรูปแบบใกล้เคียงกับกราฟความหนืดจากสตาร์ชถั่วเขียวที่ความเข้มข้นของสตาร์ชต่ำ (ร้อยละ 7) ดังภาพที่ 13 เมื่อความเข้มข้นของสตาร์ชต่ำจะไม่พบจุดที่มีความหนืดสูงสุดของกราฟความหนืดจากสตาร์ชกล้วย แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้น และเพิ่มอุณหภูมิ พบว่ามี

จุดที่เกิดความหนืดสูงสุดเกิดขึ้น ซึ่งผู้วิจัยได้อธิบายว่า เมื่อสตาร์ชมีความเข้มข้นมากขึ้น เม็ดสตาร์ชจะถูกกระทำจากสองแรง คือ แรงจากการกวน และแรงเสียดสีระหว่างเม็ดสตาร์ชเอง จึงทำให้เม็ดสตาร์ชแตกออก ดังนั้นกราฟความหนืดของสตาร์ชจากกล้วยที่ความเข้มข้นของสตาร์ชเท่ากับ 8% จะมีลักษณะใกล้เคียงกับสตาร์ชมันสำปะหลังและสตาร์ชสาคุ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าสตาร์ชจากมันฝรั่ง และมันเทศ และมีค่ามากกว่าสตาร์ชจากธัญพืชที่มีปริมาณแอมิโลสปกติ สำหรับรูปแบบการพองตัวของสตาร์ชจากกล้วยจะมีรูปแบบคล้ายคลึงกับสตาร์ชไมโล และสตาร์ชจากข้าวโพด แต่จะมีค่าต่ำกว่าการพองตัวของสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชจากมันสำปะหลัง ดังภาพที่ 14 สำหรับความสามารถในการละลายนั้น สตาร์ชจากกล้วยมีรูปแบบการละลายคล้ายคลึงกับสตาร์ชจากไมโล และมีค่าต่ำกว่าสตาร์ชมันสำปะหลังและ สตาร์ชมันฝรั่ง ภาพที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการพองตัวและความสามารถในการละลายของสตาร์ชกล้วย ซึ่งสามารถเปรียบเทียบความสามารถในการละลายที่ระดับการพองตัวเท่ากัน ซึ่งพบว่า สตาร์ชกล้วยมีระดับความสามารถในการละลายอยู่ระหว่างสตาร์ชจากมันฝรั่ง และสตาร์ชจากมันสำปะหลัง (ภาพที่ 16)

Lii *et al.* (1982) ได้ทำการวิเคราะห์ความหนืดของสตาร์ชที่ได้จากกล้วยที่ระยะความสุกที่ 0, 1 และ 2 ที่ความเข้มข้นของสตาร์ชร้อยละ 5 ซึ่งพบว่า กราฟความหนืดที่ได้มีรูปแบบที่คล้ายคลึงกันดังแสดงในภาพที่ 17 และพบว่าเมื่อกล้วยมีระยะการสุกเพิ่มขึ้น ความหนืดที่ได้จะลดลง เนื่องจากปริมาณสตาร์ชที่ลดลง นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาถึงความเข้มข้นของสตาร์ชที่มีผลต่อรูปแบบของกราฟความหนืด โดยใช้ความเข้มข้นของสตาร์ชที่ร้อยละ 5, 7 และ 8 ซึ่งพบว่า ที่ความเข้มข้นของสตาร์ชร้อยละ 5 กราฟของความหนืดจะไม่ ปรากฏจุดสูงสุดของความหนืด แต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้นเป็นร้อยละ 7 และ 8 จะสังเกตจุดสูงสุดที่อยู่บนกราฟความหนืดได้ แสดงในภาพที่ 17 ซึ่งลักษณะกราฟที่ได้นั้นมีความใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Kayisu *et al.* (1981)

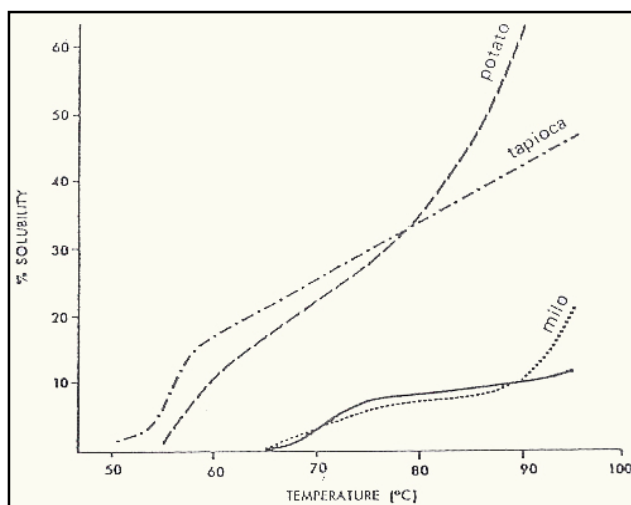


ภาพที่ 13 กราฟความหนืดที่ได้จากสตาร์ชกล้วย ที่ความเข้มข้นร้อยละ 4-8
ที่มา : Kayisu *et al.* (1981)



Banana

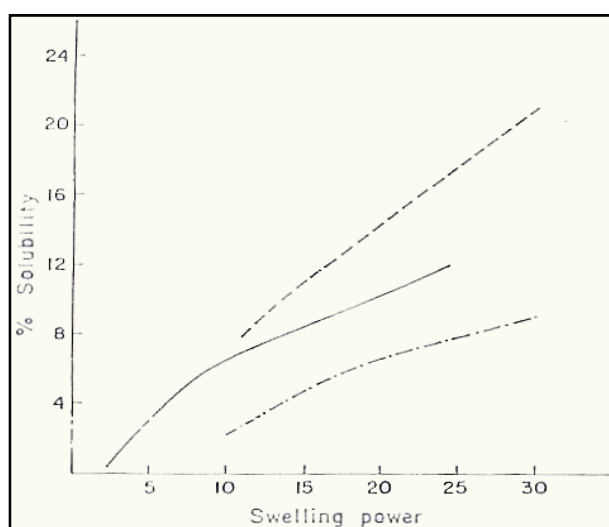
ภาพที่ 14 กราฟความสามารถในการพองตัวของสตาร์ชจากกล้วยเปรียบเทียบกับสตาร์ชชนิดอื่น
ที่อุณหภูมิต่าง ๆ
ที่มา : Kayisu *et al.* (1981)



Banana

ภาพที่ 15 กราฟความสามารถในการละลายของสตาร์ชกล้วยที่อุณหภูมิต่าง ๆ เปรียบเทียบกับสตาร์ชชนิดอื่น ๆ

ที่มา : Kayisu *et al.* (1981)



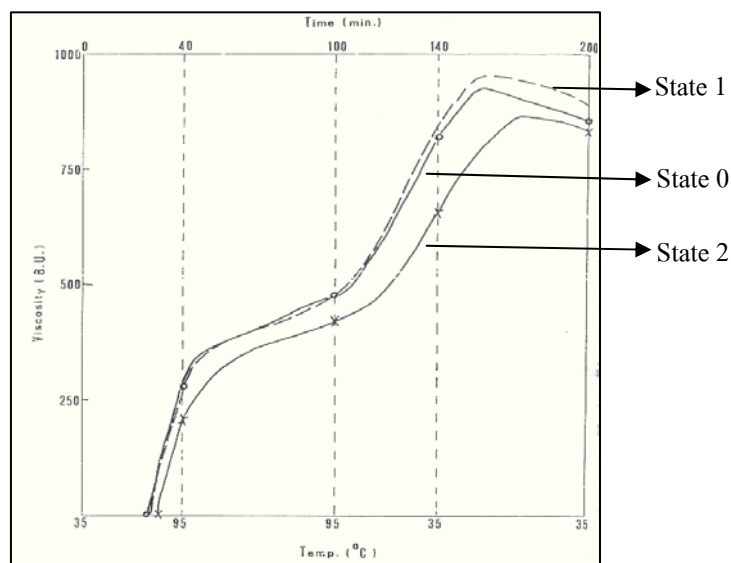
Tapioca

Banana

Potato

ภาพที่ 16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการพองตัวกับการละลายของสตาร์ชกล้วย เปรียบเทียบกับสตาร์ชมันฝรั่ง และสตาร์ชมันสำปะหลัง

ที่มา : Kayisu *et al.* (1981)



ภาพที่ 17 กราฟความหนืดที่ได้จากสตาร์ชกล้วยที่อุณหภูมิ และมีระดับระดับความสุก 0, 1 และ 2
ที่มา: Lii *et al.* (1982)

Lii *et al.* (1982) ยังได้ศึกษาถึงความสามารถในการพองตัวและความสามารถในการละลายของ สตาร์ชจากกล้วยที่ระดับของความสุก 0-3 ซึ่งพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความสามารถในการพองตัวและการละลายเพิ่มขึ้นด้วยในทุกะดับของความสุก และที่ระดับความสุกที่ 2 ทั้งความสามารถในการพองตัว และความสามารถในการละลายของสตาร์ชกล้วยจะมากที่สุดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส

วสันต์ (2543) ได้ศึกษาความสามารถในการพองตัวและการละลายของสตาร์ช กล้วย เช่นกัน ซึ่งพบว่า สตาร์ชกล้วยพันธุ์ในประเทศไทย คือ พันธุ์น้ำว้าค่อม พันธุ์หักมุก และพันธุ์ตานี จะมีความสามารถในการพองตัวและการละลายเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งพบว่า ความสามารถในการพองตัวของสตาร์ชจากกล้วยหักมุกที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสจะมีค่ามากที่สุด แต่ความสามารถในการละลายของสตาร์ชจากกล้วยน้ำว้าจะมีค่ามากที่สุดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส

Resistant starch

1. ชนิดของสตาร์ช

1.1 จำแนกตามความสามารถในการทำปฏิกิริยากับเอนไซม์

การจำแนกประเภทของสตาร์ช สามารถใช้หลักเกณฑ์ได้หลากหลายแบบ หลักเกณฑ์หนึ่งที่ Berry (1986) ได้ใช้ทำการแบ่งชนิดของสตาร์ช คือ พฤติกรรมของสตาร์ชที่แสดงหลังจากที่ให้มีการทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ โดยไม่มีการใช้สารเคมีชนิดอื่นร่วมด้วย สามารถแบ่งสตาร์ชออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้

1.1.1 สตาร์ชที่สามารถย่อยได้อย่างรวดเร็ว (rapidly digestible starch; RDS)

สตาร์ชชนิดนี้ มีองค์ประกอบหลักที่มีลักษณะเป็นแบบอสัญฐาน และมีการกระจายตัวของสตาร์ชพบในอาหารที่มีองค์ประกอบเป็นสตาร์ชที่มีการหุงสุกด้วยกระบวนการที่มีการให้ความร้อนและความชื้น เช่น ขนมันฝรั่ง เมื่อให้สตาร์ชชนิดนี้ ทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ สตาร์ชจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของโมเลกุลน้ำตาลกลูโคสในเวลา 20 นาที

1.1.2 สตาร์ชที่มีการย่อยอย่างช้า ๆ (slow digestible starch; SDS) สตาร์ชชนิด

นี้ มีองค์ประกอบหลักที่มีลักษณะเป็นอสัญฐานเช่นเดียวกัน และยังมีลักษณะของส่วนผลึกเป็นชนิด A และ C ซึ่งสามารถเกิดการรีโทรเกรดได้ในอาหารที่ผ่านการให้ความร้อนมาแล้ว สตาร์ชชนิดนี้จะถูกเปลี่ยนให้เป็นน้ำตาลกลูโคส หลังจากที่มีการทำปฏิกิริยากับเอนไซม์แล้ว 100 นาที

1.1.3 สตาร์ชที่ทนต่อการย่อย (resistant starch; RS) สตาร์ชชนิดนี้เป็น

ชิ้นส่วนของสตาร์ชขนาดเล็กที่มีความสามารถทนต่อสภาวะการย่อยโดยเอนไซม์ในร่างกาย เช่น เอนไซม์แอลฟาเอมิลเลส (α -amylase) และเอนไซม์พอลลูลานาส (pullulanase) โดยที่เอนไซม์เหล่านี้ไม่สามารถย่อยสตาร์ชชนิดนี้ได้ หลังจากปล่อยให้ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 120 นาที

1.2 จำแนกตามความสามารถในการย่อยของเอนไซม์ในร่างกาย

Sajilata *et al.* (2006) ได้แบ่งชนิดของสตาร์ชออกเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะความสามารถในการย่อย ดังนี้

1.2.1 สตาร์ชที่สามารถย่อยได้ (digestible starches) สตาร์ชชนิดนี้ เป็นสตาร์ชที่สามารถย่อยได้โดยเอนไซม์ในร่างกาย โดยหมายรวมถึง สตาร์ชที่สามารถถูกย่อยได้อย่างรวดเร็ว (RDS) และ สตาร์ชที่ถูกย่อยอย่างช้า ๆ (SDS) ด้วย ซึ่งสตาร์ชชนิดนี้ จะถูกย่อยอย่างสมบูรณ์ในส่วนของลำไส้เล็ก

1.2.2 สตาร์ชที่ทนต่อการย่อย (resistant starch) สตาร์ชชนิดนี้เป็นสตาร์ชที่ไม่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์ภายในร่างกายของมนุษย์

2. ชนิด, โครงสร้าง และประโยชน์ของ resistant starch

Resistant starch ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1982 โดย Englyst และคณะทำงานที่กำลังพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ปริมาณของเส้นใยอาหาร (dietary fibre) โดยพบว่ามีสตาร์ชหลงเหลืออยู่หลังจากผ่านกระบวนการย่อยด้วยเอนไซม์ อีกทั้งยังพบว่า นอกจากจะทนทานต่อการย่อยของร่างกายแล้ว ยังสามารถทำให้เกิดกระบวนการหมักในลำไส้ใหญ่ได้ (Nugent, 2005; Champ and Faisant 1996) ต่อมา กลุ่มสมาคมของนักวิทยาศาสตร์ในสหภาพยุโรป (EU) ซึ่งเป็นที่รู้จักในนามของ EURESTA (European Resistant Starch Research Group) ได้ให้คำจำกัดความของ resistant starch ว่าเป็นปริมาณของสตาร์ช รวมทั้งผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายตัวของสตาร์ช (degradation) ซึ่งมีความสามารถทนทานต่อสภาวะการย่อยในลำไส้เล็กของคน และเมื่อสตาร์ชชนิดนี้ ถูกส่งต่อมายังลำไส้ใหญ่ จะสามารถเป็นสารตั้งต้นให้แก่จุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในลำไส้ใหญ่ได้ และทำให้เกิดกระบวนการหมักขึ้นผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากการหมักนั้น คือ ไฮโดรเจน, คาร์บอนไดออกไซด์, มีเทน, และกรดไขมันสายสั้น (short chain fatty acid; SCFA) (Nugent, 2005)

โดยทั่วไป สามารถแบ่งชนิดของ Resistant starch ได้ 4 ประเภท คือ (Nugent, 2005; Sajilata *et al.*, 2006)

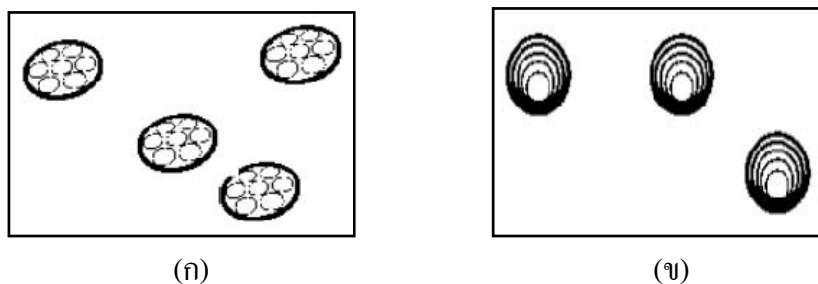
2.1 Resistant starch type 1 (RS₁) เป็นสตาร์ชที่มีความคงทนต่อการย่อย เนื่องจากลักษณะทางกายภาพที่ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าไปทำลายเม็ดสตาร์ชได้ เช่น เมล็ดพืชที่ถูกขัดสีบางส่วน และอาหารที่มีปริมาณของสตาร์ชสูง วัดปริมาณ resistant starch จากความแตกต่างของปริมาณกลูโคสที่ปล่อยออกมาหลังจากให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยากับอาหารที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (homogenized food sample) กับตัวอย่างอาหารที่ไม่ผ่านกระบวนการ (nonhomogenized food sample)

2.2 Resistant starch type 2 (RS₂) เป็นสตาร์ชที่ยังคงรูปร่าง หรือคงสภาพอยู่ใน เม็ดสตาร์ช และมีความทนทานต่อการย่อยของเอนไซม์ วัดปริมาณ resistant starch จากความแตกต่างของปริมาณกลูโคสที่ถูกปล่อยออกมาระหว่างตัวอย่างอาหารที่ผ่านกระบวนการทำให้ความร้อนและทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (boiled homogenized food sample) กับตัวอย่างอาหารที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ (unboiled, nonhomogenized food sample) ในสตาร์ชดิบทั่วไป โมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ชมีการอัดกันอย่างหนาแน่นในแนวของวงแหวนของเม็ดสตาร์ช และดูดความชื้นได้ง่าย ซึ่งลักษณะเช่นนี้ ทำให้มีความต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ ตัวอย่างของสตาร์ชชนิดนี้ คือ สตาร์ชจากกล้วยดิบ

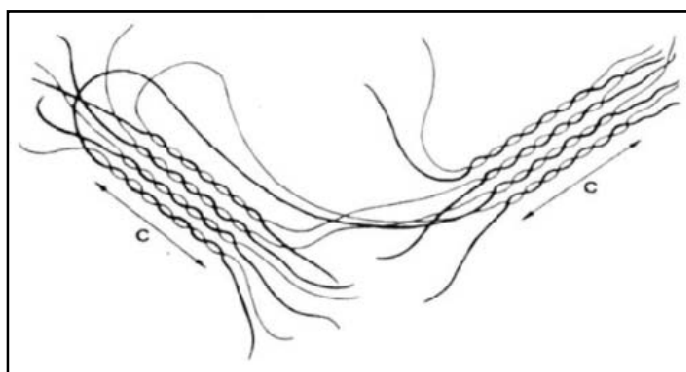
2.3 Resistant starch type 3 (RS₃) เป็น resistant starch ชนิดที่มีมากที่สุด ซึ่งเป็นสตาร์ชที่เกิดจากโมเลกุลเอมิโลสที่ผ่านกระบวนการเจลาติไนเซชัน และมีการทำให้เย็นและเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ หรือเกิดกระบวนการรีโทรเกรเดชัน วัดปริมาณ resistant starch ชนิดนี้จากสัดส่วนปริมาณกลูโคสของสตาร์ชที่มีความคงทนต่อการหุงต้ม และทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์

2.4 Resistant starch type 4 (RS₄) เป็น resistant starch ที่เกิดจากกระบวนการดัดแปรสตาร์ชทางเคมี ที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลของสตาร์ช โดยมีพันธะชนิดอื่นนอกเหนือไปจากพันธะ α -(1-4) และ α -(1-6) ซึ่งทำให้โมเลกุลของสตาร์ชมีความแข็งแรงของพันธะมากขึ้น

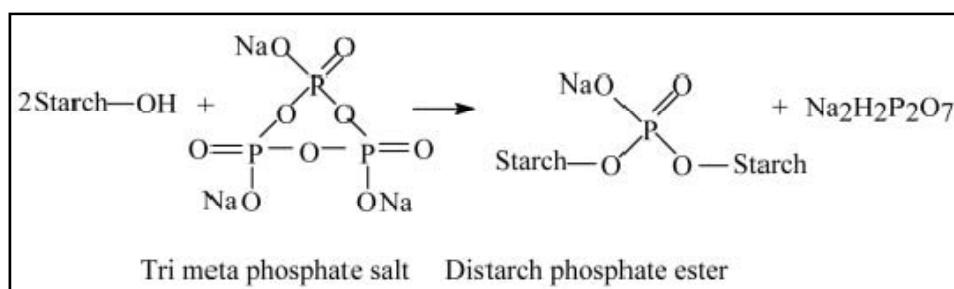
ลักษณะโครงสร้างของ resistant starch ทั้ง 4 ชนิด แสดงดังภาพที่ 18-20



ภาพที่ 18 ลักษณะเม็ดสตาร์ชของ resistant starch type 1 (ก) และ type 2 (ข)
ที่มา: Sajilata *et al.* (2006)



ภาพที่ 19 ลักษณะการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลแอมิโลส ในการเกิดโครงสร้างแบบเกลียวคู่ และทำให้เกิดสมบัติความเป็น resistant starch type 3
ที่มา: Sajilata *et al.* (2006)



ภาพที่ 20 การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการทางเคมี และทำให้เกิด resistant starch type 4
ที่มา: Sajilata *et al.* (2006)

ลักษณะเด่นที่สำคัญของ resistant starch คือ สตาร์ชจะไม่สามารถถูกย่อยได้ด้วยเอนไซม์ และดูดซึมภายในลำไส้เล็กของมนุษย์ได้ โดย resistant starch ที่ไม่ถูกย่อยโดยลำไส้เล็ก จะผ่านมาถึงส่วนของลำไส้ใหญ่ และถูกหมักโดย จุลินทรีย์ภายในลำไส้ใหญ่ ได้เป็นกรดไขมันสายสั้น ๆ เช่น แอซิเตต โพรพิโอเนต และบิวทีเรต กรดไขมันทั้งสามชนิดสามารถถูกดูดซึมและขนส่งไปยังตับได้ กรดไขมันที่เกิดขึ้นนี้จะไปยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค เพิ่มปริมาณของของเหลว และปรับสภาวะความเป็นกรด-ด่าง ภายในลำไส้ใหญ่ให้ต่ำลง และสามารถช่วยป้องกันมะเร็งในลำไส้ใหญ่ได้ (กล้านรงค์ และเกื้อกูล, 2546)

Faisant *et al.* (1995) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติการเป็น resistant starch ของสตาร์ชจากกล้วยดิบ โดยนำไปผสมกับผลิตภัณฑ์อาหารเข้าที่มีการทำให้สุก แล้วให้ผู้บริโภครทดสอบจำนวน 30 คน มีการเก็บตัวอย่างอาหารหลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 8-5 ชั่วโมง โดยมีวิธีการเก็บตัวอย่างอาหารที่ผ่านการย่อยบริเวณปลายลำไส้เล็กด้วยวิธีการพิเศษ จากนั้นจึงนำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เปรียบเทียบกับลักษณะเม็ดสตาร์ชจากกล้วยที่ยังไม่มีการบริโภค พบว่าหลังจากเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง ยังสามารถพบสตาร์ชกล้วยมีปริมาณถึงร้อยละ 80 ของสตาร์ชทั้งหมด และเม็ดสตาร์ชจากกล้วยดิบที่ผ่านการบริโภคแล้วนั้น จะมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ ไม่เรียบ มีรูพรุน และเป็นรู ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการทำงานของเอนไซม์เอมิเลสในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์ ซึ่งสตาร์ชกล้วยก่อนที่จะนำไปบริโภคจะมีลักษณะเป็นเม็ดสตาร์ชที่มีผิวเรียบ และไม่มีรูพรุน สตาร์ชจากกล้วยดิบมีสมบัติเป็น resistant starch จากการค้นพบนี้ จึงอาจเป็นแนวทางในการพัฒนานาสตาร์ชจากกล้วยดิบไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพ และผลิตภัณฑ์อาหารอื่น ๆ ได้มากขึ้น

อุปกรณ์ และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

- 1.1 กัล้วยดิบพันธุ์น้ำว่า M. (ABB group) ‘Kluai Nam Wa’
- 1.2 กัล้วยดิบพันธุ์หอมทอง M.(AAA group, Gros Michel) ‘Kluai Homtong’
- 1.3 กัล้วยดิบพันธุ์ไข่ M. (AAB group) ‘Kluai Khai’

โดยกล้วยทั้งสามพันธุ์ มีอายุการเก็บเกี่ยวประมาณ 110-125 วัน นับตั้งแต่ออกปลีกกล้วย โดยรับซื้อจากเกษตรกรที่ตลาดไทย ต. คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี

2. เครื่องมือ และอุปกรณ์

- 2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการผลิตแป้งและสตาร์ชจากกล้วย

- 2.1.1 เครื่องปอกเปลือก และสไลด์ผลไม้ด้วยมือ

- 2.1.2 เครื่องอบแบบลมร้อน (Tray dryer) ผลิตโดยบริษัท B.W.S. Trading, Ltd. (Partnership) ประเทศไทย

- 2.1.3 ตู้อบแบบลมร้อน (Hot air oven) รุ่น 600 D06062 ผลิตโดยบริษัท Memmert ประเทศเยอรมัน

- 2.1.4 เครื่องบดตัวอย่างแห้ง (Ultra-centrifugal mill) รุ่น ZM 1 ผลิตโดยบริษัท Retch ประเทศเยอรมัน

- 2.1.5 เครื่องหมุนเหวี่ยง ควคุมอุณหภูมิต่ำ (Refrigerate centrifuge) รุ่น Himac CR 20B2 ผลิตโดยบริษัท Hitachi, Ltd.

- 2.1.6 เครื่องกวนที่สามารถควบคุมความเร็วรอบได้ (High torque stirrer) รุ่น R50D ผลิตโดยบริษัท Ingenieurburo CAT, M. Zip ประเทศเยอรมัน

- 2.1.7 ตะแกรงร่อนขนาด 80, 100, 170 และ 200 เมช (Laboratory Test Sieve) ผลิตโดยบริษัท Endecotts Ltd. ประเทศอังกฤษ

2.1.8 เครื่องหมุนเหวี่ยงขนาดเล็ก (Bench centrifuge)

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพ

2.2.1 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Ohaus Analytical Plus) รุ่น GT4100 ผลิตโดยบริษัท Ohaus Corp. ประเทศสหรัฐอเมริกา

2.2.2 เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน (Kjeldahl apparatus) ผลิตโดยบริษัท BUCHI Laboratory Equipment ประเทศสวิสเซอร์แลนด์

2.2.3 เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณไขมัน รุ่น 1043 Soxtec system HT6 ผลิตโดยบริษัท Tecator ประเทศสวีเดน

2.2.4 เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle Furnace) รุ่น FSE-261-210D ผลิตโดยบริษัท Gallenkamp ประเทศอังกฤษ

2.2.5 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) รุ่น Spectronic 22 ผลิตโดยบริษัท Milton Roy Corp. ประเทศสหรัฐอเมริกา

2.2.6 ตู้แช่เยือกแข็ง (Freezer) รุ่น SF-C95 ผลิตโดยบริษัท Sanyo

2.2.7 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (Shaking water bath)

2.2.8 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter) รุ่น Pyris1 ผลิตโดยบริษัท Perkin-Elmer ประเทศสหรัฐอเมริกา

2.2.9 เครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว (Rapid visco analyzer) รุ่น RVA3D ผลิตโดยบริษัท Newport Scientific Instrument & Engineering ประเทศออสเตรเลีย

2.2.10 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyser) รุ่น TA-TX2 ผลิตโดยบริษัท Stable Microsystem ประเทศอังกฤษ

2.2.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสงส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น JSM-5600LV ผลิตโดยบริษัท JEOL ประเทศญี่ปุ่น

2.2.12 กล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่าน (Light microscope) รุ่น DME ผลิตโดยบริษัท Leica ประเทศสหรัฐอเมริกา

2.2.13 ไมโครปิเปต ขนาด 1000 ไมโครลิตร (μ l)

2.2.14 อุปกรณ์เครื่องแก้ว

3. ชุดตรวจสอบสำเร็จ

ใช้ชุดตรวจสอบสำหรับการตรวจสอบปริมาณแอมิโลส, สตาร์ชที่เกิดความเสียหาย และปริมาณ resistant starch โดยใช้ชุดตรวจสอบของบริษัท Megazyme (Megazyme International Ireland Ltd.,) ประเทศไอร์แลนด์ ได้แก่

3.1 ชุดตรวจสอบปริมาณแอมิโลส (Amylose/Amylopectin assay kit catalog no. K-AMYL, assay procedure K-AMYL 04/06; 100 assays per kit)

3.2 ชุดตรวจสอบปริมาณ starch damage (Starch damage assay kit catalog no. K-SDAM, assay procedure K-SDAM 11/01; 200 assays per kit)

3.3 ชุดตรวจสอบปริมาณ resistant starch (Resistant starch assay kit catalog no. K-RSTAR, assay procedure K-RSTAR 08/05; 100 assays per kit)

4. สารเคมี

4.1 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์แอมิโลส

4.1.1 เอนไซม์ และรีเอเจนต์ที่มีในชุดตรวจสอบ ได้แก่

- ก. Freeze dried Con A (200mg)
- ข. Amyloglucosidase/Fungal α -amylase suspension
- ค. Glucose Determination Reagent
- ง. Glucose Reagent Buffer
- จ. Glucose Standard Solution
- ฉ. Starch Reference Sample (with specified content of amylase)

4.1.2 สารเคมีอื่น ๆ

- ก. DMSO บริษัท Ridel de Haen
- ข. กรดแอซิดิกเข้มข้น บริษัท Caro Erba Reagenti
- ค. โซเดียมไฮดรอกไซด์ บริษัท Merck
- ง. โซเดียมเอไซด์ บริษัท Asia Pasific Specialty Chemical Ltd.
- จ. โซเดียมแอซิเตท บริษัท Asia Pasific Specialty Chemical Ltd.
- ฉ. โซเดียมคลอไรด์ บริษัท Merck
- ช. แคลเซียมคลอไรด์ บริษัท Merck
- ซ. แมกนีเซียมคลอไรด์ บริษัท Ajax Finechem
- ณ. แมงกานีสคลอไรด์ Ajax Finechem

4.2 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ปริมาณสตาร์ชที่เกิดความเสียหาย (Starch damage)

4.2.1 เอนไซม์และรีเอเจนต์ที่มีในชุด

- ก. Fungal α -amylase
- ข. Amyloglucosidase
- ค. Glucose Determination Reagent
- ง. Glucose Reagent Buffer (concentrate)
- จ. Glucose Standard Solution
- ฉ. Control Wheat Flour (with stated level of Starch Damage)

4.2.2 สารเคมีอื่น ๆ

- ก. กรดแอซิดิกเข้มข้น บริษัท Caro Erba Reagenti
- ข. แคลเซียมคลอไรด์ บริษัท Merck
- ค. กรดซัลฟิวริกเจือจาง (ร้อยละ 0.2 โดยปริมาตร) บริษัท J.P. Baker

4.3 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ปริมาณ resistant starch

4.3.1 สารเคมีที่มีอยู่ในชุด

- ก Pancreatic α -amylase (Pancreatin, 10g, 3 Ceralpha Units/mg)
- ข Amyloglucosidase (12 mL, 3300 Units/mL)
- ค Glucose Determination Reagent (GOPOD) (for 1 litre)
- ง Reagent concentrations after dissolution in buffer
- จ Glucose Reagent Buffer (concentrate) (50 mL).
- ฉ Glucose Standard Solution (1 mg/mL in 0.2% benzoic acid).
- ช Resistant Starch Control (with stated level of RS).

4.3.2 สารเคมีอื่น ๆ

- ก. กรดมาลิก ห้างหุ้นส่วนจำกัดเลิบบิลเล่ย์ ประเทศไทยจำกัด
เพื่อใช้เตรียม สารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมมาลิเอท ความเข้มข้น 0.1M, pH 6
- ข. สารละลายบัฟเฟอร์ โซเดียมแอซิเตท ความเข้มข้น 1.2 M
- ค. สารละลายบัฟเฟอร์ โซเดียมแอซิเตท ความเข้มข้น 100 mM.
- ง. เอทานอล (Ethanol) ร้อยละ 95 โดยปริมาตร

4.4 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์โปรตีน

- 4.4.1 กรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 95-97 บริษัท J.P. Baker
- 4.4.2 คอปเปอร์ซัลเฟต บริษัท Asia Pacific Specialty Chemical Ltd.
- 4.4.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ บริษัท Merck
- 4.4.4 กรดบอริก บริษัท Merck
- 4.4.5 โพแทสเซียมซัลเฟต บริษัท Ajax Finechem
- 4.4.6 กรดไฮโดรคลอริก บริษัท J.P. Baker
- 4.4.7 เมทิลเรดและโบรโมครีซอลกรีน

4.5 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ไขมัน คือ ปีโตรเลียมอีเทอร์

4. อุปกรณ์ประมวลผลและวิเคราะห์ผลทางสถิติ

4.1 ไมโครคอมพิวเตอร์

4.2 โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS V. 13.0

วิธีการ

1. การตรวจสอบลักษณะวัตถุดิบเบื้องต้น

1.1 ตรวจสอบเหลี่ยมและสีผิวของเปลือก

นำกล้วยทั้ง 3 พันธุ์ที่นำมาเป็นวัตถุดิบตรวจสอบลักษณะภายนอก โดยดูลักษณะของเหลี่ยม และสีผิวของเปลือก โดยใช้หลักเกณฑ์ในการดูเหลี่ยมและสีผิวของเปลือกตามวิธีของเบญจมาศ (2538, 2545)

1.2 ตรวจสอบลักษณะอื่นๆ ของผล

สุ่มตัวอย่างที่ใช้เป็นวัตถุดิบจากกล้วยทั้ง 3 พันธุ์ พันธุ์ละ 10 ผล นำมาตรวจสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง สีของเนื้อผล และการมีเมล็ด โดยทำการสุ่ม และตรวจวัดทั้งหมดพันธุ์ละ 3 ครั้ง

2. การเตรียมวัตถุดิบ

2.1 การผลิตแป้งกล้วย

นำกล้วยดิบมาทำการปอกเปลือก ล้างน้ำ หั่นเป็นแว่นที่มีความหนาประมาณ 0.5-1 เซนติเมตร จากนั้นนำไปอบด้วยเครื่องอบแบบลมร้อน (tray dryer) ที่อุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาบด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช เก็บในภาชนะที่ปิดสนิท ที่

อุณหภูมิห้อง สังเกตลักษณะภายนอกของแป้งที่ได้ และคำนวณปริมาณร้อยละของผลได้ (% yield) เป็นน้ำหนักเปียก (wet basis) โดยเทียบจากน้ำหนักเนื้อผลทั้งหมด

2.2 การสกัดสสารจากกล้วยดิบ

นำแป้งกล้วยที่ผลิตได้ผสมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้อัตราส่วน 1:5 (แป้ง 1: สารละลาย 5) ใช้เครื่องมือคน คนให้เข้ากันตลอดเวลา เป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมงหลังจากนั้นนำไปหมนเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 3,000g ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เทส่วนของเหลวทิ้ง ขูดส่วนสีน้ำตาลด้านบนของส่วนที่ตกตะกอนออกผสมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้อัตราส่วน 1:5 (แป้ง : สารละลาย) คนตลอดเวลาต่อไปอีก เป็นเวลา 3 ชั่วโมงหมนเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 3,000g ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เทส่วนของเหลวทิ้ง ขูดส่วนสีน้ำตาลด้านบนของส่วนที่ตกตะกอนออก ทำละลายส่วนที่ตกตะกอนด้วยน้ำกลั่นด้วยอัตราส่วน 1:2 (แป้ง : น้ำกลั่น) นำตัวอย่างแป้งที่แขวนลอยในน้ำกลั่นร้อนผ่านตะแกรงขนาด 80, 170 และ 200 เมช โดยใช้ น้ำกลั่นล้างส่วนที่ไม่สามารถละลายได้ออกให้ได้มากที่สุด ทั้งให้ตกตะกอน 45 นาที เทของเหลวด้านบนออก ทำซ้ำอีกประมาณ 2-3 ครั้ง โดยทำละลายส่วนที่ตกตะกอนด้วยน้ำกลั่นด้วยอัตราส่วน 1:2 เช่นเดิมปรับความเป็นกรด-ด่าง ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl) 0.05 นอร์แมล เป็น 6.5-7.0 หมนเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 3,000g ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เทส่วนของเหลวทิ้ง ขูดส่วนสีน้ำตาลด้านบนของส่วนที่ตกตะกอนออก ได้เป็นสสารเปียก และนำไปอบแห้งด้วยเครื่องอบแบบลมร้อนอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 5-8 ชั่วโมง ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช เก็บในภาชนะปิดสนิท ที่อุณหภูมิห้อง สังเกตลักษณะของสสารที่ผลิตได้ และคำนวณปริมาณร้อยละของผลได้ของสสาร (% yield) เป็นน้ำหนักแห้ง (dry basis) โดยเทียบจากน้ำหนักแป้งแห้ง (dry basis)

3. ตรวจสอบสมบัติของแป้ง และสสารจากกล้วยดิบ

3.1 องค์ประกอบทางเคมีองค์ประกอบทางเคมี

3.1.1 ปริมาณความชื้น ตามวิธีของ AOAC (2000) No. 925.10 (ภาคผนวก ข ข้อ 1 หน้า 133)

3.1.2 ปริมาณโปรตีนวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Buchi Kjeldahl System ดัดแปลงวิธีการของ AOAC (2000) Method 920.87 (ภาคผนวก ข ข้อ 2 หน้า 133)

3.1.3 ปริมาณไขมัน วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Soxtec system HT 6 ดัดแปลงวิธีการของ AOAC (2000) Method 920.85 (ภาคผนวก ข ข้อ 3 หน้า 134)

3.1.4 ปริมาณเถ้า วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Muffle furnace ดัดแปลงวิธีการของ AOAC (2000) Method 923.03 (ภาคผนวก ข ข้อ 4 หน้า 135)

3.1.5 ปริมาณแอมิเลส ใช้ชุดตรวจสอบ (Enzyme Kits) สำเร็จของบริษัท Megazyme (ภาคผนวก ข ข้อ หน้า 136)

3.1.6 สตาร์ชที่เกิดความเสียหาย (starch damage) ใช้ชุดตรวจสอบ (Enzyme Kits) สำเร็จของบริษัท Megazyme (ภาคผนวก ข ข้อ 5 หน้า 136)

3.1.7 ปริมาณ resistant starch ใช้ชุดตรวจสอบ (Enzyme Kits) สำเร็จของบริษัท Magazyme (ภาคผนวก ข ข้อ 6 หน้า 139)

3.2 การตรวจคุณสมบัติทางกายภาพคุณสมบัติทางกายภาพ

3.2.1 ค่าสีและดัชนีความขาว

ตรวจสอบค่าสีของแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยทั้ง 3 พันธุ์ ด้วยเครื่องวัดสี (Minolta Spectrophotometer) โดยดัดแปลงวิธีการของ โดยวัดในระบบ hunter ซึ่งค่าที่ทำการวิเคราะห์ได้ คือ L, a และ b โดย

L คือ ความสว่างของสี มีค่า 0-100 (L=0 คือ สีดำ L=100 คือ สีขาว)

a คือ ค่าความเป็นสีเขียว-แดง (ค่า -a หมายถึง สีเขียว ค่า +a หมายถึง สีแดง)

b คือ ค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (ค่า -b หมายถึง สีนํ้าเงิน ค่า +b หมายถึง สีเหลือง)

นำค่าที่ได้มาคำนวณหาดัชนีความขาว (Whiteness index: WI) (สูตรการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค หน้า 146)

3.2.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้งและสตาร์ช

ก) ตรวจสอบโดยสังเกตลักษณะของเม็ดสตาร์ช และองค์ประกอบอื่น ๆ ที่ปนอยู่ในแป้ง รวมทั้งรูปร่าง และขนาดของเม็ดสตาร์ชแบบ 2 มิติโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงปกติ (Light Microscope) LIECA 350d โดยนำตัวอย่างแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยทั้งสามพันธุ์ เขี่ยลงบน slide สำหรับใช้ส่องดูอนุภาค หยดน้ำกลั่นลงไปบน ตัวอย่างบน slide จากนั้นจึงเขี่ยเพื่อให้เกิดการกระจายตัวของอย่าง ปิดด้วย cover slid นำไปส่องที่กำลังขยาย 10 และ 40 เท่า

ข) ตรวจสอบโดยสังเกตลักษณะของเม็ดสตาร์ช และองค์ประกอบอื่น ๆ ที่ปนอยู่ในแป้ง รวมทั้งรูปร่าง และขนาดของเม็ดสตาร์ชแบบ 3 มิติ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องกราด (SEM=Scanning Electron Microscope) โดยนำแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยที่มีปริมาณความชื้นสุดท้ายไม่เกินร้อยละ 7 มาทำการตรวจสอบ ใช้กำลังขยาย 1,000 เท่า และเพิ่มกำลังขยายเป็น 2,500 เท่า สำหรับตัวอย่างสตาร์ช

3.3 การตรวจคุณสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์

3.3.1 สมบัติทางด้านการพองตัวและการละลาย

ตรวจสอบกำลังการพองตัว และการละลายของแป้งและสตาร์ชจากกล้วยทั้ง 3 พันธุ์ โดยดัดแปลงวิธีของ Bello Perez *et al.* (1999) (ภาคผนวก ข ข้อ 1.3 หน้า 171)

3.3.2 สมบัติด้านการเปลี่ยนแปลงความหนืด

ตรวจสอบโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว หรืออาร์วีเอ (Rapid Visco Analyzer; RVA) ที่ความเข้มข้นของแป้ง และสตาร์ชร้อยละ 7, 8, 9, 10 และ 12 (dry basis) โดยดัดแปรวิธีการตรวจสอบ และการวิเคราะห์ผลจากวิธีของ AACC (2000) Method 61-02 (ภาคผนวก ง ข้อ 1 หน้า 148)

3.3.3 สมบัติเชิงความร้อน โดยใช้เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter; DSC)

ก) ตรวจสอบสมบัติการเกิดเจลในเซชัน

ตรวจสอบด้วยวิธี ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีของ Waliszewski *et al.* (2003) และ Nunez-Santiago *et al.* (2004) โดยชั่งตัวอย่างปริมาณ 7.0 มิลลิกรัม ใส่ในภาชนะปลอดสนิม (stainless pan) เติมน้ำกลั่นที่ปราศจากไอออน (deionized water) จนมีความชื้นร้อยละ 70 ของน้ำหนักแห้ง (อัตราส่วนระหว่างตัวอย่าง : น้ำ เท่ากับ 30 : 70) ปิดฝาภาชนะให้สนิท บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นใส่ตัวอย่างในเครื่องดีเอสซี ใช้ภาชนะเปล่าเป็นสารอ้างอิงให้ความร้อนกับตัวอย่าง 10 ถึง 130 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็ว 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที ทำการวิเคราะห์หา อุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลในเซชัน (onset temperature, T_o) อุณหภูมิที่เกิดกระบวนการเจลในเซชันสูงสุด (peak temperature, T_p) อุณหภูมิสุดท้ายที่เกิดเจลในเซชัน (conclusion temperature, T_c) และพลังงานที่ใช้ในการสลายโครงร่างผลึก (enthalpy, ΔH)

ข) ตรวจสอบสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชัน

นำตัวอย่างที่ตรวจสอบในข้อ 3.3.3 (ก) ไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 และ 21 วัน แล้วจึงนำมาตรวจสอบการเกิดรีโทรเกรเดชัน โดยให้ความร้อนกับตัวอย่าง 10 ถึง 130 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็ว 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที ทำการวิเคราะห์หาอุณหภูมิเริ่มต้นที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างที่เกิดรีโทรเกรเดชัน (onset temperature, RT_o) อุณหภูมิที่ตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (peak temperature, RT_p) อุณหภูมิสุดท้ายของตัวอย่างที่เกิดรีโทรเกรเดชันที่เกิดการเปลี่ยนแปลง (conclusion temperature, RT_c) และพลังงานที่ใช้ในการสลายโครงร่างผลึกของตัวอย่างที่เกิดรีโทรเกรเดชัน (enthalpy, ΔH_{RET})

ค) ร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชัน

นำค่าพลังงานในการสลายโครงร่างผลึกของตัวอย่างที่เกิดเจลในเซชัน (ΔH) และพลังงานที่ใช้ในการสลายโครงร่างผลึกของตัวอย่างที่เกิดรีโทรเกรเดชัน (ΔH_{RET}) ของตัวอย่างที่เก็บเป็นระยะเวลา 7 และ 21 วัน มาคำนวณเป็นร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชัน (ภาคผนวก ข ข้อ 7 หน้า 144)

3.3.4 สมบัติด้านความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง

โดยวัดเนื้อสัมผัสของเจล ทำการตรวจสอบเนื้อสัมผัสของเจลที่ผ่านเครื่อง RVA โดยใช้ตัวอย่างที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 ด้วยเครื่องมือ Texture analyzer และตรวจสอบโดยหัววัดอะลูมิเนียมทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร (P100) ซึ่งดัดแปรวิธีจาก Bello-Perez *et al.* (1999) รายงานค่าความแข็ง (hardness) และความเกาะตัวกัน (cohesiveness) และความยากง่ายในการเคี้ยว (gumminess) ของเจลตัวอย่าง

3.3.5 ปริมาณน้ำที่เหวี่ยงแยกออกจากเจล (Syneresis)

ตรวจสอบความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งของเจลจากแป้งและสตาร์ชกล้วย ซึ่งเลือกใช้สารละลายน้ำแป้ง และสตาร์ชที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 และใช้วิธี ซึ่งดัดแปรจากวิธีการของ Yuan and Thompson (1998) (ภาคผนวก ข ข้อ หน้า 180)

4. การวิเคราะห์ผลทดลองทางสถิติ

คำนวณผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการตรวจสอบคุณภาพทางเคมี ฟิสิกส์ และเคมีเชิงฟิสิกส์ โดยใช้แผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (complete randomized design, CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของการทดลอง ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (version 13.0) เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของสมบัติด้านต่าง ๆ ของแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยในแต่ละตัวอย่าง ด้วยการทดสอบตามวิธีการแบบดันแคน (Duncan's new multiple range test) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

5. สถานที่ทดลอง

ห้องปฏิบัติการเคมี และห้องปฏิบัติการ Rice and Starch ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ห้องปฏิบัติการสมบัติเชิงความร้อน ชั้น 4 ห้อง 4215 ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

งานกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ฝ่ายเครื่องมือกลาง สถาบันวิจัยและพัฒนา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. ระยะเวลาทำการทดลอง

ตั้งแต่เดือนมีนาคม 2547 ถึงเดือน มีนาคม 2550