

ผลและการวิจารณ์

การตรวจสอบลักษณะวัตถุดิบเบื้องต้น

การเลือกใช้กล้วยซึ่งเป็นวัตถุดิบเป็นสิ่งสำคัญสำหรับงานวิจัยนี้เป็นอย่างมาก เนื่องจากกล้วยเป็นผลไม้ประเภท Climacteric คือ เมื่อผลสุกจะมีการหายใจเพิ่มขึ้นและต้องการเอทิลินมาช่วยกระตุ้นให้เกิดการสุก โดยขณะที่กล้วยสุกจะมีการสร้างเอทิลินเพิ่มขึ้นเองด้วย กล้วยสุกจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาล มีการเปลี่ยนแปลงสีผิวหรือเปลือก เนื้อในนุ่มขึ้น และมีกลิ่นหอม (เบญจมาศ, 2538) แต่ในงานวิจัยนี้ ต้องการกล้วยที่มีปริมาณของสสารมาก ซึ่งต้องใช้กล้วยที่อยู่ในระยะดิบ และไม่มีลักษณะของผลดังกล่าว

ลักษณะของเหลี่ยม และสีผิวของเปลือกกล้วย 3 สายพันธุ์ (กล้วยน้ำว้า กล้วยหอมทองและกล้วยไข่) ที่อายุการเก็บเกี่ยวประมาณ 110-125 วัน แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ลักษณะของผลกล้วยดิบที่ใช้ในงานวิจัย

พันธุ์	เกณฑ์ที่ใช้วัดระดับความแก่ของกล้วย		ลักษณะอื่น ๆ ของกล้วย		
	เหลี่ยมกล้วย	สีผิวของกล้วย	เส้นผ่านศูนย์กลาง (เซนติเมตร) ^{1/}	สีเนื้อ	อื่น ๆ
น้ำว้า	มีเหลี่ยมชัดเจน	สีเขียวไม่มีสีเหลือง	3.675 ± 0.013	ขาว	มีอนุภาคสีดำขนาดเล็ก
หอมทอง	มีเหลี่ยมชัดเจน	สีเขียวไม่มีสีเหลือง	3.462 ± 0.020	ขาว	มีอนุภาคสีดำขนาดเล็ก
ไข่	มีเหลี่ยมชัดเจน	สีเขียวไม่มีสีเหลือง	3.112 ± 0.007	ขาว	มีอนุภาคสีดำขนาดเล็ก

หมายเหตุ ^{1/} ค่าเฉลี่ยจากการวัดทั้งหมด 10 ซ้ำ และ
ตัวเลขหลัง $\pm$ คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จากตารางที่ 6 พบว่า กล้วยทั้ง 3 สายพันธุ์มีเหลี่ยมที่สังเกตได้อย่างชัดเจน สีผิวที่เปลือกเป็นสีเขียวไม่มีสีเหลืองปน เมื่อพิจารณาใช้หลักเกณฑ์ตัดสินความสุกของกล้วย โดยใช้เหลี่ยมเป็นเกณฑ์ (เบญจมาศ, 2545) พบว่า เป็นกล้วยที่อยู่ในระยะผลแก่ $\frac{3}{4}$ (Light Full $\frac{3}{4}$) ซึ่งจากเกณฑ์ดังกล่าว กล้วยจะมีระดับความแก่ประมาณร้อยละ 80 และเมื่อพิจารณาใช้สีผิวของเปลือก (CSIRO, 1972) การสุกของกล้วยจะเป็นระยะการสุกที่ 1 เนื่องจากไม่พบสีเหลืองบนเปลือก ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสีผิวของเปลือกกล้วย แสดงดังภาคผนวก ก เส้นผ่านศูนย์กลางของผลกล้วยที่วัดได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการวัดกลางผล จำนวนสิบผลของกล้วยแต่ละพันธุ์ จำนวน 3 ครั้ง พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยกล้วยน้ำว้ามีของผลใหญ่ที่สุด โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.675 เซนติเมตร และกล้วยไข่มีขนาดของผลเล็กที่สุด (เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.112 เซนติเมตร) ความแตกต่างของขนาดของผล เป็นเพราะความแตกต่างของสายพันธุ์ของกล้วยทั้ง 3 สายพันธุ์ แต่อย่างไรก็ตาม พบว่ากล้วยทั้ง 3 พันธุ์นี้มีอนุภาคสีดำขนาดเล็ก ลักษณะของเนื้อมีสีขาว และแข็งเหมือนกัน ซึ่งเป็นการยืนยันว่ากล้วยที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ ยังอยู่ในระยะดิบ และน่าจะมีปริมาณของสารที่สูง

แป้งและสตาร์ชจากกล้วยดิบ

1. ร้อยละปริมาณของผลได้

เนื่องจากกล้วยแต่ละพันธุ์มีลักษณะเฉพาะ ทั้งทางด้านขนาด รูปร่าง และองค์ประกอบทางเคมี ทำให้ได้ปริมาณของผลได้ของแป้ง และสตาร์ชแตกต่างกัน ปริมาณร้อยละของแป้งคิดจากผลกล้วยสดทั้งหมด (wet basis) และสตาร์ชจากกล้วยคิดจากน้ำหนักแป้งแห้งทั้งหมด (dry basis) รวมถึงลักษณะที่สังเกตด้วยตาเปล่า แสดงดังตารางที่ 7 พบว่า ร้อยละของปริมาณผลได้ของแป้งกล้วยพันธุ์หอมทอง (HTF) มีค่ามากที่สุด (ร้อยละ 56.50) และใกล้เคียงกับร้อยละปริมาณผลได้ของแป้งกล้วยน้ำว้า (NWF) (ร้อยละ 54.50) ส่วนแป้งกล้วยไข่ (KHF) จะมีร้อยละปริมาณของผลได้น้อยที่สุด (ร้อยละ 48.12) เนื่องมาจากการสูญเสียส่วนเนื้อไปขณะปอกเปลือก กล้วยไข่จะมีเปลือกที่ติดกับส่วนของเนื้อผลมาก ทำให้ต้องฝานเนื้อออกไปบางส่วน เพื่อไม่ให้เปลือกของกล้วยไข่ติดไปกับเนื้อผล ที่จะนำไปผลิตเป็นแป้ง ในขณะที่กล้วยน้ำว้า และกล้วยหอมทอง สามารถปอกเปลือกออกได้ง่ายกว่า ดังนั้นจึงไม่เสียส่วนเนื้อผลที่จะนำไปผลิตเป็นแป้ง

ตารางที่ 7 ลักษณะและร้อยละของปริมาณผลได้ของแป้งกล้วยดิบ

พันธุ์	ร้อยละปริมาณผลได้		ลักษณะเมื่อสังเกต และมองด้วยตาเปล่า	
	แป้ง (wet basis) ^{1/}	สตาร์ช (dry basis) ^{2/}	แป้ง	สตาร์ช
น้ำว่า (NW)	54.50	33.18	สีน้ำตาลอ่อน มีอนุภาคสี ดำปนอยู่บ้าง มีกลิ่นหอม เนื้อละเอียด เนียนกว่า	ขาว ไม่มีสี ไม่มีสิ่งเจือปน
หอมทอง (HT)	56.50	29.67	สีน้ำตาล มีอนุภาคสีดำ ปน มีกลิ่นหอม เนื้อหยาบ กว่า NWF	ขาว ไม่มีสี ไม่มีสิ่งเจือปน
ไข่ (KH)	48.12	30.37	สีน้ำตาลเข้มออกเหลือง มี กลิ่นหอม เนื้อหยาบ	ขาว ไม่มีสี ไม่มีสิ่งเจือปน

หมายเหตุ ^{1/} เป็นร้อยละของปริมาณผลได้ ที่คิดจากน้ำหนักของผลกล้วยทั้งหมด

^{2/} เป็นร้อยละของปริมาณผลได้ โดยคิดจากน้ำหนักของแป้งแห้งทั้งหมด

เมื่อนำแป้งกล้วยทั้ง 3 สายพันธุ์ มาทำการสกัดสตาร์ช พบว่าร้อยละของปริมาณผลได้ของการสกัดสตาร์ชจาก NWF จะมีปริมาณมากที่สุด (ร้อยละ 33.18) ส่วน HTF และ KHF จะได้ปริมาณของสตาร์ชใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 29.67 และ 30.37 ตามลำดับ) ปริมาณของสตาร์ชที่ได้แตกต่างกันนี้ เป็นผลมาจากลักษณะของกล้วยแต่ละพันธุ์ ถึงแม้ว่ากล้วยจะมีระดับความสุกเท่ากัน แต่ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของแต่ละพันธุ์จะแตกต่างกันไป โดยกล้วยไข่ และกล้วยหอมทองซึ่งอยู่ในกลุ่ม AA และ AAA ตามลำดับจะมีปริมาณของแป้ง และสตาร์ช มากในช่วงแรก และจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาลมากขึ้นเมื่อระยะของการสุกเปลี่ยนไป แต่กล้วยน้ำว่า ซึ่งอยู่ในกลุ่ม ABB จะมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นน้ำตาลน้อยกว่า (ภาพที่ 2) นอกจากนี้ องค์ประกอบของกล้วยแต่ละพันธุ์ยังมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับการเพาะปลูก ความสมบูรณ์ของดิน ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว (เบญจมาศ ,2545)

2. องค์ประกอบทางเคมี

กล้วยต่างสายพันธุ์ ถึงแม้จะมีระยะการสุกเดียวกัน แต่จะมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้ จะส่งผลให้ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่นำไปแปรรูป และสตาร์ชไปเป็นวัตถุดิบ ในการผลิต มีสมบัติแตกต่างกันไปด้วย องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยทั้ง 3 สายพันธุ์ แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งและสตาร์ชกล้วย

(หน่วย: ร้อยละ)

ตัวอย่าง ^{1/}	ความชื้น	โปรตีน (N*6.25)	ไขมัน	เถ้า	แอมิโลส ^{5/}
NWF	6.88 ± 0.310 a	1.88 ± 0.107 b	2.15 ± 0.078 d	2.40 ± 0.252 c	ND
HTF	6.84 ± 0.273 a	4.47 ± 0.461 c	4.88 ± 0.198 e	4.44 ± 0.310 e	ND
KHF	6.55 ± 0.170 a	4.37 ± 0.099 c	1.56 ± 0.032 c	3.05 ± 0.411 d	ND
NWS	7.16 ± 0.381 b	0.20 ± 0.06 a	0.12 ± 0.064 b	0.05 ± 0.001 a	28.03 ± 0.971 c
HTS	7.40 ± 0.049 bc	0.21 ± 0.010 a	0.10 ± 0.048 ab	0.06 ± 0.010 a	13.36 ± 0.714 a
KHS	7.83 ± 0.042 c	0.17 ± 0.002 a	0.03 ± 0.001a	0.13 ± 0.028 b	20.32 ± 0.368 b

หมายเหตุ ^{1/} NWF คือ แป้งกล้วยน้ำว้า NWS คือ สตาร์ชกล้วยน้ำว้า
HTF คือ แป้งกล้วยหอมทอง HTS คือ สตาร์ชกล้วยหอมทอง
KHF คือ แป้งกล้วยไข่ KHS คือ สตาร์ชกล้วยไข่

^{2/} เป็นค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำจาก 2 ตัวอย่าง

^{3/} อักษรที่ต่างกันในแต่ละแถว มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{4/} ตัวเลขหลัง ± คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล

^{5/} ND (Not Determined) หมายถึง ไม่มีการตรวจสอบ

จากตารางที่ 8 ปริมาณความชื้นของ NWF, HTF และ KHF มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) คือร้อยละ 6.88, 6.84 และ 6.55 เมื่อพิจารณาปริมาณไขมัน และเถ้า พบว่า HTF จะมีปริมาณมากที่สุด คือ ร้อยละ 4.88 และ 4.44 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาปริมาณโปรตีนพบว่า HTF มีปริมาณโปรตีนใกล้เคียงกับ KHF และมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) นอกจากนี้พบว่า KHF มีค่าปริมาณไขมันต่ำที่สุด คือ ร้อยละ 1.56 และแตกต่างสถิติ ($p\leq 0.05$) กับปริมาณไขมันของ NWF และ HTF ซึ่งมีค่าร้อยละ 2.15 และ 4.88 ตามลำดับ สำหรับปริมาณเถ้าที่วิเคราะห์ได้ พบว่า HTF จะมีปริมาณเถ้ามากกว่า KHF และ NWF (ร้อยละ 4.44, 3.05 และ 2.40 ตามลำดับ) และมีค่าแตกต่างกันทางสถิติ ($p\leq 0.05$)

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณองค์ประกอบของสตราซ์ทั้ง 3 ชนิด (ตารางที่ 8) พบว่าสตราซ์ กล้วยน้ำวัว (NWS), สตราซ์กล้วยหอมทอง (HTS) และ สตราซ์กล้วยไข่ (KHS) มีปริมาณองค์ประกอบใกล้เคียงกัน และมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) คือ ปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 7.16, 7.40 และ 7.83 มีปริมาณโปรตีนเท่ากับร้อยละ 0.20, 0.21 และ 0.17 และมีปริมาณไขมันเท่ากับร้อยละ 0.12, 0.10 และ 0.03 ตามลำดับ สำหรับปริมาณเถ้าที่วิเคราะห์ได้จากตัวอย่าง NWS และ HTS มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.05 และ 0.06 ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างทางสถิติกับ KHS (ร้อยละ 0.13)

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของแป้งและสตราซ์จากกล้วยดิบในแต่ละพันธุ์ (ตารางที่ 8) พบว่ากล้วย ทั้ง 3 สายพันธุ์ มีค่าองค์ประกอบทางเคมีแต่ละชนิดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) โดยตัวอย่างในกลุ่มของแป้งจะมีค่าองค์ประกอบทางเคมีมากกว่าตัวอย่างสตราซ์ซึ่งความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีนี้เป็นลักษณะเฉพาะของกล้วยแต่ละพันธุ์ เช่น ลักษณะของการเพาะปลูก พื้นที่ที่ใช้เพาะปลูก และการดูแลรักษา ซึ่งสอดคล้องกับ Mota *et al.* (2000) ที่ได้ตรวจสอบปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของแป้งกล้วยต่างสายพันธุ์จำนวน 8 ตัวอย่างจากประเทศเม็กซิโก ได้แก่ ABB (Prata ana, Mysore, Maca และ Prata comun), AA (Oura da mata) และ AAA (Nanica และ Nanica7) พบว่า แม้จะเป็นกล้วยสายพันธุ์ที่เพาะปลูกอยู่ในประเทศเดียวกัน แต่กลับมีปริมาณองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาร้อยละของปริมาณสตราซ์ที่ทำการสกัดได้จากกล้วยแต่ละพันธุ์ พบว่า แป้งกล้วยแต่ละพันธุ์จะให้ปริมาณสตราซ์ที่แตกต่างกัน ซึ่งน่าจะเป็นเพราะ แป้งของกล้วยแต่ละพันธุ์มีปริมาณขององค์ประกอบอื่น ๆ ที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรตต่างกัน (ตารางที่ 8) ทำให้ได้ปริมาณของสตราซ์ที่สกัดได้ไม่เท่ากันด้วย (ตารางที่ 7) ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของ KHF และ HTF พบว่า มีปริมาณไขมัน โปรตีน และเถ้า

มากกว่า NWF เมื่อนำแป้งมาสกัดเป็นสตาร์ชแล้ว พบว่า KHF และ HTF มีปริมาณสตาร์ชที่สกัดได้น้อยกว่า NWF

3 ปริมาณสตาร์ชที่เกิดการเสียหาย (damage starch)

สตาร์ชที่เกิดความเสียหาย เป็นลักษณะของเม็ดสตาร์ชที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการบวนการในการผลิตสตาร์ชที่มีการใช้แรงกล (mechanical operations) เช่น การโม่ หรือบดตัวอย่าง (Dubat, 2004) โดยสามารถเกิดได้ใน 2 ลักษณะ คือ ทำให้เกิดการแตก (break) หรือ หัก (crack) (Dubat, 2004 อ้างถึง Dubois, 1949) สตาร์ชที่เกิดความเสียหาย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของสตาร์ช เช่น มีการดูดซึมน้ำ หรือกักเก็บน้ำไว้ เพิ่มขึ้นเป็น 2-4 เท่าของสตาร์ชปกติ หรือถูกทำลายด้วยเอนไซม์บางชนิด เช่น β -amylases ได้ง่ายมากขึ้น ซึ่งสมบัติที่เปลี่ยนไปนี้สามารถทำให้เกิดลักษณะทั้งในด้านบวก และด้านลบแก่ผลิตภัณฑ์ได้ เช่น ทำให้เกิดการกักเก็บน้ำไว้ได้ดีขึ้นในผลิตภัณฑ์ขนมอบ แต่การมีสตาร์ชที่เกิดความเสียหายในระดับที่สูงเกิน จะทำให้เกิดลักษณะเนื้อสัมผัสที่เหนียว และไม่เป็นที่ต้องการ หรือทำให้ผลิตภัณฑ์เสียน้ำเร็วเกินไปเกิดการสูญเสียในขณะหุงต้มมากขึ้น นอกจากนี้ อาจทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีสีน้ำตาลมากขึ้นด้วย (Dubat, 2004) สตาร์ชที่เกิดความเสียหาย เป็นดัชนีหนึ่งที่สามารถใช้ ตรวจสอบประสิทธิภาพของวิธีการสกัดสตาร์ช และคุณภาพของสตาร์ชสกัดที่ได้ (Lumdubwong and Seib, 1999) ปริมาณของสตาร์ชที่เกิดความเสียหายในงานวิจัย ตรวจสอบโดยใช้เอนไซม์ แสดงดังตารางที่ 9

จากตารางที่ 9 พบว่า สตาร์ชจากกล้วยทั้ง 3 พันธุ์ มีปริมาณของสตาร์ชที่เสียหายในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยพบว่า HTS มีปริมาณสตาร์ชเสียหายร้อยละ 0.648 ซึ่งมีปริมาณมากกว่าสตาร์ชเสียหายของ NWS และ KHS (ร้อยละ 0.402 และ 0.343 ตามลำดับ) ($p \leq 0.05$)

จากผลการตรวจสอบ พบว่า สตาร์ชทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณของสตาร์ชที่เกิดความเสียหายในระดับที่แตกต่างกัน แสดงว่าสตาร์ชจากกล้วยดิบแต่ละพันธุ์ มีความสามารถทนทานต่อกระบวนการผลิตที่มีการใช้แรงกล ได้แตกต่างกัน ระดับของการเกิดที่แตกต่างกันนี้อาจเนื่องมาจากลักษณะ ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชของกล้วยแต่ละพันธุ์มีความแตกต่างกัน โดยเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่กว่า มีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายจากกระบวนการบด หรือโม่ได้มากกว่า (Dubat, 2004) นอกจากนี้ พบว่าปริมาณของสตาร์ชที่เกิดความเสียหายมีค่าน้อย แสดงว่าวิธีการสกัดมีประสิทธิภาพดี

ตารางที่ 9 ปริมาณสตาร์ชที่เกิดความเสียหาย

(หน่วย: ร้อยละ)

ตัวอย่าง	สตาร์ชที่เกิดความเสียหาย ^{1/, 2/, 3/}
NWS	0.402 ± 0.653 a
HTS	0.648 ± 0.558 b
KHS	0.343 ± 0.286 a

- หมายเหตุ
- ^{1/} ค่าเฉลี่ยจากการตรวจสอบ 2 ตัวอย่าง 3 ครั้ง
 - ^{2/} อักษรที่ต่างกันในแต่ละแถว มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
 - ^{3/} ตัวเลขหลัง $\pm$ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล

4 ปริมาณ resistant starch

ลักษณะเด่นที่สำคัญที่สุดของสตาร์ชจากกล้วยดิบ คือ การเป็น resistant starch แบบที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติ (RS₂) (González-Soto *et al.*, 2006) ซึ่งเป็น สตาร์ชที่ไม่สามารถถูกย่อยได้ด้วยเอนไซม์ในระบบการย่อยอาหาร อีกทั้งยังไม่สามารถดูดซึมภายในลำไส้เล็กของมนุษย์ได้ ดังนั้น resistant starch จึงมีคุณสมบัติเทียบเท่ากับเส้นใยอาหาร มีประโยชน์ต่อระบบการขับถ่าย และระบบหมุนเวียนเลือด โดย resistant starch ที่ไม่ถูกย่อยโดยลำไส้เล็ก จะผ่านมาถึงส่วนของลำไส้ใหญ่ ได้เป็นกรดไขมันสายสั้น ๆ เช่น แอซิเตท โพรพิโอเนท และบิวทิเรท กรดไขมันทั้งสามชนิดสามารถถูกดูดซึมและขนส่งไปยังตับได้ กรดไขมันที่เกิดขึ้นนี้จะไปยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค เพิ่มปริมาณของของเหลว และปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง ภายในลำไส้ใหญ่ให้ต่ำลง และสามารถช่วยป้องกันมะเร็งในลำไส้ใหญ่ได้ (กล้านรงค์ และเกื้อกูล, 2546) ปริมาณร้อยละของ resistant starch ที่ได้จากการตรวจสอบแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยดิบสายพันธุ์ไทย แสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ปริมาณ resistant starch ที่พบในแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยดิบ 3 สายพันธุ์

หน่วย: ร้อยละ

สายพันธุ์กล้วย	ชนิดของตัวอย่าง ^{1/, 2/, 3/}	
	แป้ง	สตาร์ช
น้ำว้า (NW)	20.40 ± 4.772 b	40.69 ± 5.018 b
หอมทอง (HT)	14.31 ± 4.008 a	32.65 ± 4.684 a
ไข่ (KH)	16.94 ± 2.123 ab	38.55 ± 3.429 b

- หมายเหตุ
- ^{1/} ค่าเฉลี่ยจากการตรวจสอบ 3 ตัวอย่าง 2 ครั้ง
 - ^{2/} อักษรที่ต่างกันในแต่ละแถว มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
 - ^{3/} ตัวเลขหลัง ± คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล

เมื่อพิจารณาปริมาณ resistant starch ของแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยดิบทั้ง 3 สายพันธุ์ (ตารางที่ 10) พบว่า KHF มีปริมาณ resistant starch ใกล้เคียงกับ NWF และ HTF ($p > 0.05$) ในขณะที่ NWF มีปริมาณ resistant starch สูงกว่า HTF อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) สำหรับกลุ่มสตาร์ช พบว่า NWS มีปริมาณ resistant starch ใกล้เคียงกับ KHS ($p > 0.05$) ซึ่งทั้ง NWS และ KHS มีปริมาณ resistant starch สูงกว่า HTS ($p \leq 0.05$)

จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าว พบว่า กล้วยสายพันธุ์เดียวกัน จะมีปริมาณของ resistant starch ในแป้งน้อยกว่าสตาร์ช ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากปริมาณของสตาร์ชเริ่มต้นในตัวอย่างแป้งมีค่าน้อยจึงทำให้มีปริมาณ resistant starch น้อยด้วย เมื่อพิจารณาแต่ละสายพันธุ์พบว่า กล้วยสายพันธุ์น้ำว้า (NW) มีปริมาณ resistant starch มากที่สุด รองลงมาเป็นกล้วยไข่ (KH) และสายพันธุ์ที่มีปริมาณ resistant starch น้อยที่สุด คือ หอมทอง (HT) ซึ่งจะสังเกตได้ว่า ปริมาณของ resistant starch มีความสัมพันธ์กับปริมาณแอมิโลสในตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่มีแอมิโลสสูง เช่นกล้วยน้ำว้า จะมีปริมาณ resistant starch สูงด้วย ซึ่งผลดังกล่าว สอดคล้องกับ Berry (1986) ที่พบว่า ปริมาณของ resistant starch ในสตาร์ชข้าวฟ่างมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับปริมาณแอมิโลสในตัวอย่าง กล่าวคือ ตัวอย่างที่มีปริมาณแอมิโลสสูง จะมีปริมาณ resistant starch สูงเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณ resistant starch ที่ตรวจสอบได้ในแต่ละชนิดของตัวอย่าง (standard deviation, SD) พบว่ามีค่าสูง อาจ

เกิดจากระยะเวลา ของการทำปฏิกิริยาของตัวอย่าง และเอนไซม์ ไม่เท่ากันในขณะทำการทดลอง เนื่องจากการตรวจสอบปริมาณ resistant starch เป็นการใช้อินไซม์เพื่อทำปฏิกิริยากับสตาร์ชเพื่อให้เกิดการทำลายโครงสร้าง และทำให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้าย คือ น้ำตาลกลูโคส ดังนั้น การใช้เวลาไม่เท่ากัน อาจส่งผลต่อปริมาณของน้ำตาลกลูโคสที่วัดได้ หรืออาจเนื่องมาจากความไม่เหมาะสมของสภาวะที่ทำการตรวจสอบ เช่น อุณหภูมิห้องขณะทำการตรวจสอบ (ประมาณ 30-35 องศาเซลเซียส) ไม่ใช่อุณหภูมิที่เอนไซม์ทำงานมีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งจะส่งผลต่อปริมาณกลูโคสที่วัดได้เช่นกัน

สมบัติของแป้งและสตาร์ชจากกล้วยดิบ

1 สมบัติทางกายภาพ

1.1 ค่าสี

จากตารางที่ 11 ปรากฏผลค่าความสว่าง (L) ของแป้งจากกล้วยดิบทั้งสามพันธุ์ พบว่า มีค่าแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เรียงลำดับ ได้แก่ NWF มีความสว่างน้อยที่สุด และมีค่าเท่ากับ 77.46, KHF เท่ากับ 78.11 และ HTF เท่ากับ 78.58 เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างสตาร์ชของกล้วยทั้ง 3 พันธุ์ พบว่า NWS มีค่าความสว่างมากที่สุด คือ 98.11 และมีค่าแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับ HTS (97.19) และ KHS (97.32) ตามลำดับ ค่าความสว่างของสีจะมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจนในส่วน of ตัวอย่างในกลุ่มที่เป็นแป้ง กับตัวอย่างที่เป็นสตาร์ช ทั้งนี้เนื่องมาจาก การสกัดสตาร์ชจากแป้งจะเป็นการคัดแยกองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น โปรตีน, ไขมัน, เถ้า ออกไป นอกจากนี้ในกระบวนการสกัดสตาร์ชยังมีการกำจัดองค์ประกอบสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นจากกระบวนการใช้ความร้อน (อบแห้ง) หรือสารสีน้ำตาลที่ไม่ผ่านการกรองในกระบวนการสกัดสตาร์ช ทำให้ได้สารประกอบคาร์โบไฮเดรตที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น ซึ่งพิจารณาได้จากปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในสตาร์ชจากตารางที่ 8

ค่าความเป็นสีเขียว-แดง (a) โดยหากเป็นค่าลบ (-a) แสดงว่า ตัวอย่างมีสีเขียว และหากเป็นค่าบวก (+a) แสดงว่า ตัวอย่างมีสีแดง จากตารางที่ 11 พบว่า NWF มีค่าความเป็นสีเขียว เท่ากับ -1.32 ซึ่งมีค่าน้อยที่สุด และมีค่าแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับตัวอย่างแป้ง และสตาร์ชชนิดอื่น โดย HTF และ KHF มีค่าเท่ากับ -0.94 และ -1.07 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างในกลุ่มสตาร์ช พบว่า สตาร์ชกล้วยทั้งสามชนิดมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) และมีค่าความเป็นสีเขียวน้อยกว่าในกลุ่มตัวอย่างที่เป็นแป้ง โดย NWS, HTS และ KHS มีค่า -0.35, -0.28 และ -0.20 ตามลำดับ

ค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b) โดยค่าเป็นลบแสดงถึงความเป็นสีเหลือง (-b) ส่วนค่าบวก (+b) แสดงถึงความเป็นสีน้ำเงิน จากตารางที่ 11 NWF มีค่ามากที่สุด คือ 21.84 ในขณะที่ HTF มีค่าเท่ากับ 16.87 และ KHF มีค่าเท่ากับ 19.29 เมื่อพิจารณากลุ่มตัวอย่างที่เป็นสตาร์ช พบว่า NWS มีค่าความเป็นสีเหลืองน้อยกว่า HTS และ KHS ($p>0.05$) (0.14, 0.63 และ 0.36 ตามลำดับ)

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ของการวัดสี (L, a และ b) มาคำนวณ เป็นค่าดัชนีความขาวของตัวอย่าง (ตารางที่ 11) พบว่าค่าดัชนีความขาวของสตาร์ชกล้วยทั้ง 3 สายพันธุ์มีค่าสูงกว่าแป้งกล้วยในสายพันธุ์เดียวกัน โดยเรียงลำดับค่าดัชนีความขาวน้อยไปมากได้ดังนี้ NWF (68.59) > KHF (70.80) > HTF (72.71) > HTS (97.07) > KHS > (97.29) > NWS (98.06) ($p\leq 0.05$) ตามลำดับ

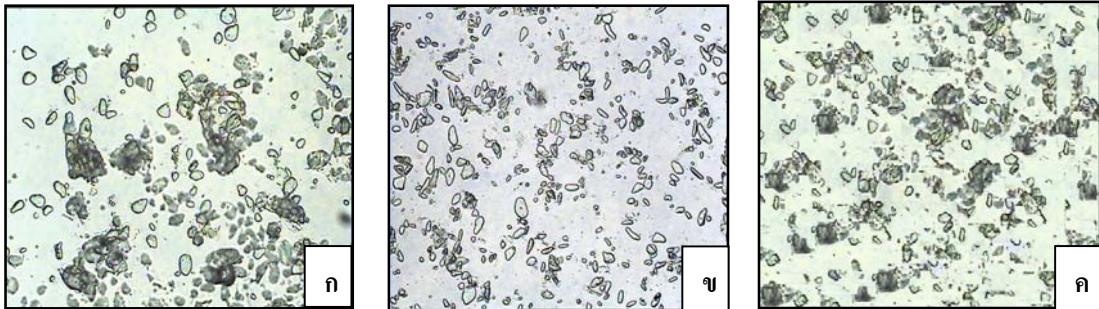
ดัชนีความขาว เป็นเกณฑ์หนึ่งในการวัดความบริสุทธิ์ของสตาร์ชที่ทำการสกัด โดยสตาร์ชที่มีความบริสุทธิ์จะต้องมีค่าดัชนีความขาวสูง และปริมาณโปรตีนต่ำ (Lumdubwong and Seib, 1999) จากตารางที่ 8 และตารางที่ 11 พบว่า สตาร์ชกล้วยทั้ง 3 สายพันธุ์ มีปริมาณโปรตีนต่ำ และมีค่าดัชนีความขาวสูง

ตารางที่ 11 ค่าสีที่วัดโดยระบบ hunter ของแป้งและสตาร์ชกล้วยดิบ

ตัวอย่าง	ค่าสี ^{1/, 2/, 3/, 4/}			ดัชนีความขาว ^{5/}
	L	a	b	
NWF	77.46 ± 0.41 a	-1.32 ± 0.15 a	21.84 ± 0.11 e	68.59 ± 0.31 a
HTF	78.58 ± 0.23 c	-0.94 ± 0.42 b	16.87 ± 0.19 c	72.71 ± 0.06 c
KHF	78.11 ± 0.26 b	-1.07 ± 0.84 ab	19.29 ± 0.35 d	70.80 ± 0.04 b
NWS	98.11 ± 0.09 e	-0.35 ± 0.15 c	0.14 ± 0.07 a	98.06 ± 0.06 f
HTS	97.19 ± 0.08 d	-0.28 ± 0.26 c	0.63 ± 0.34 b	97.07 ± 0.06 d
KHS	97.32 ± 0.20 d	-0.20 ± 0.07 c	0.36 ± 0.04 ab	97.29 ± 0.18 e

- หมายเหตุ^{1/} L คือ ค่าความสว่างของสี มีค่า 0-100 โดย L=0 คือ มีด L=100 คือ ความสว่าง
- a คือ ค่าความเป็นสีเขียว-แดง โดย ค่า -a หมายถึง สีเขียว +a หมายถึง สีแดง
- b คือ ค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน โดย ค่า-b หมายถึง สีเหลือง +b หมายถึง สีน้ำเงิน
- ^{2/} เป็นค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำจาก 2 ตัวอย่าง
- ^{3/} อักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
- ^{4/} ตัวเลขหลัง ± คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล
- ^{5/} เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณ

2.1 การศึกษาลักษณะ และรูปร่างของแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยดิบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงปกติ

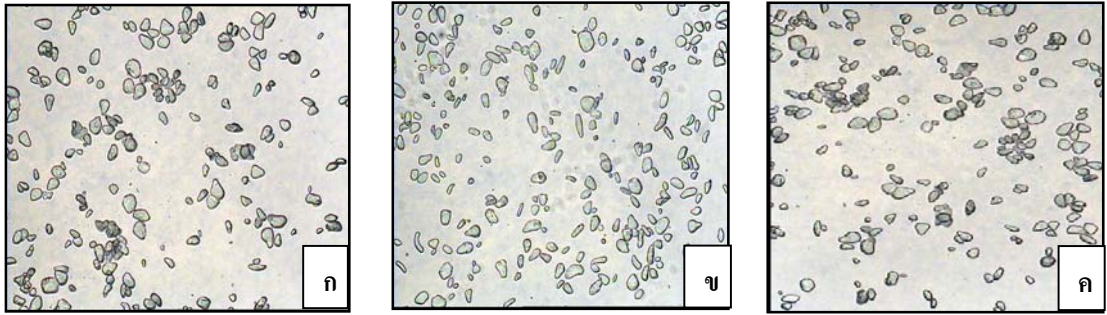


ภาพที่ 21 ลักษณะและรูปร่างของ NWF (ก) HTF (ข) และ KHF (ค) เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงปกติ ที่กำลังขยาย 10X

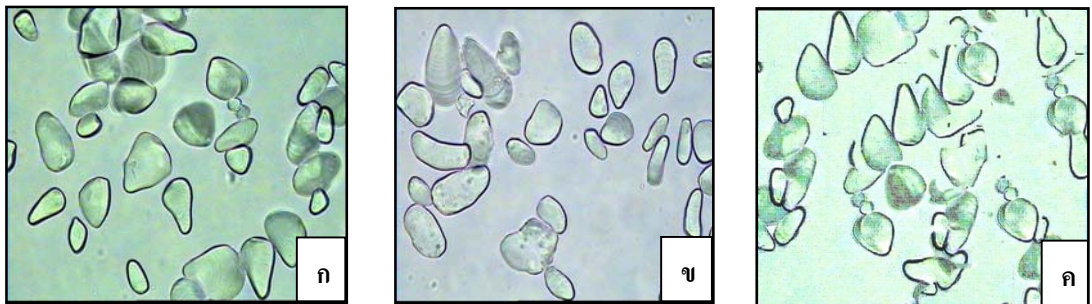


ภาพที่ 22 ลักษณะและรูปร่างของ NWF (ก) HTF (ข) และ KHF (ค) เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงปกติ ที่กำลังขยาย 40X

จากภาพที่ 21 และ 22 สังเกตว่าแป้งกล้วยทั้ง 3 พันธุ์ จะมีอนุภาคอื่น ๆ ที่ไม่ใช่สตาร์ชปนอยู่ องค์ประกอบอื่น ๆ เหล่านี้ไม่ได้แทรกตัวอยู่ในอนุภาคของเม็ดสตาร์ช แต่จะอยู่ในลักษณะปกคลุมบนพื้นผิวเท่านั้น เมื่อนำแป้งกล้วยไปสกัดเป็นสตาร์ชพบว่าอนุภาคจะถูกกำจัดออกไป สังเกตได้จากภาพที่ 23 และ 24



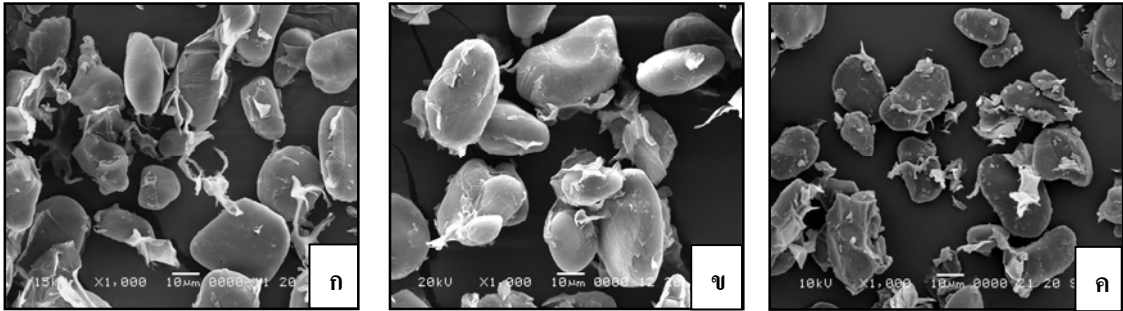
ภาพที่ 23 ลักษณะและรูปร่างของ NWS (ก) HTS (ข) และKHS (ค) เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงปกติ ที่กำลังขยาย 10X



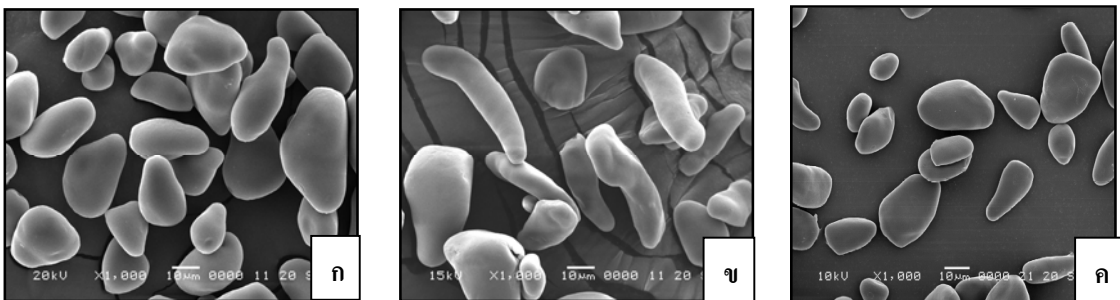
ภาพที่ 24 ลักษณะและรูปร่างของ NWS (ก) HTS (ข) และKHS(ค) เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงปกติ ที่กำลังขยาย 40X

เมื่อสังเกตลักษณะของเม็ดสตาร์ชจากกล้วยทั้ง 3 พันธุ์ (ภาพที่ 23 และ 24) พบว่า เม็ดสตาร์ชจะมีรูปร่างไม่แน่นอน สตาร์ชจากกล้วยน้ำว้าจะมีลักษณะหลายรูปแบบ โดยมีทั้งลักษณะค่อนข้างกลม บางเม็ดมีลักษณะคล้ายเปลือกหอยและมีขนาดต่าง ๆ กัน และมีส่วนของเม็ดสตาร์ชที่มีลักษณะยาวรี ส่วนสตาร์ชกล้วยหอมทอง (HTS) พบว่า ส่วนใหญ่จะมีลักษณะยาว เรียว ในขณะที่เม็ดสตาร์ชของกล้วยไข่ (KHS) จะมีลักษณะทั้งกลม และยาวรี นอกจากนี้ เมื่อสังเกตเม็ดสตาร์ชจากกล้วยทั้ง 3 พันธุ์ จะเห็นวงภายในคล้ายเปลือกหอยดังภาพที่ 24

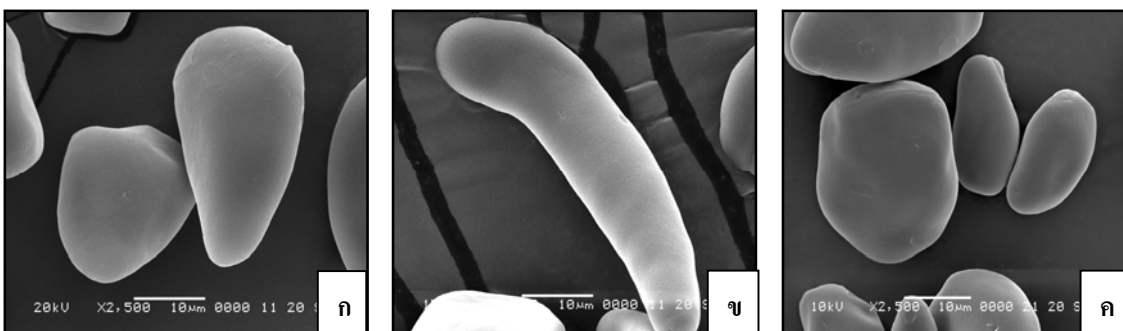
2.2 การศึกษาลักษณะ และรูปร่างของแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยดิบด้วยกล้องจุลทรรศน์
อิเล็กตรอน แบบแสงส่องกราด (SEM)



ภาพที่ 25 ลักษณะและรูปร่างของ NWF (ก) HTF (ข) และ KHF (ค) เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์
อิเล็กตรอนแบบแสงส่องกราด ที่กำลังขยาย 1000X



ภาพที่ 26 ลักษณะและรูปร่างของ NWS (ก) HTS (ข) และ KHS (ค) เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์
อิเล็กตรอนแบบแสงส่องกราด ที่กำลังขยาย 1000X



ภาพที่ 27 ลักษณะและรูปร่างของ NWS (ก) HTS (ข) และ KHS (ค) เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์
อิเล็กตรอนแบบแสงส่องกราดที่กำลังขยาย 2500X

จากการตรวจสอบรูปร่าง และลักษณะของแป้ง (ภาพที่ 25) และเมื่อดูดาว (ภาพที่ 26 และ 27) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสงส่องกราดพบว่า แป้งกล้วยจะมีองค์ประกอบอื่น ๆ ปะปนอยู่ ซึ่งส่วนมากจะอยู่บนผิวของเมื่อดูดาว เมื่อดูดาวบางหน่วยจะถูกเชื่อมติดกันด้วยองค์ประกอบชนิดอื่นที่มีลักษณะเป็นเยื่อใย บางหน่วยจะแยกอยู่อย่างอิสระ และรวมถึงมีลักษณะมีกลุ่มก้อนของเมื่อดูดาวขนาดใหญ่ อาจเนื่องมาจากตัวอย่างมีความชื้น เมื่อนำแป้งมาสกัด ได้เป็นสตาร์ช พบว่าองค์ประกอบอื่น ๆ ที่ติดอยู่บนพื้นผิวหลุดออก สตาร์ชที่ได้มีลักษณะผิวเรียบ (ภาพที่ 26 และ 27) ซึ่งเป็นการยืนยันถึงประสิทธิภาพที่ดีของวิธีการสกัดสตาร์ช ที่ทำให้สตาร์ชที่ได้มีความบริสุทธิ์ โดยดูได้จากสิ่งเจือปนที่มีน้อย นอกจากนี้ความสมบูรณ์ของเมื่อดูดาวยังแสดงถึงความแข็งแรงของเมื่อดูดาวที่ทนต่อกระบวนการสกัด โดยพบว่า มีสตาร์ชที่เกิดความเสียหายน้อย (ตารางที่ 9) เมื่อดูดาวของ NWS จะมีลักษณะค่อนข้างกลม และยาว สำหรับ HTS จะมีลักษณะยาว เรียว และ KHS จะมีลักษณะค่อนข้างกลม ลักษณะและรูปร่างของเมื่อดูดาว เป็นลักษณะเฉพาะของสตาร์ชแต่ละแต่ละสายพันธุ์ เมื่อดูดาวของ NWS (ABB group) ที่ทำการวิจัยโดย วสันต์ (2543) มีลักษณะคล้ายเปลือกหอย และมีรูปร่างหลายเหลี่ยม เมื่อดูดาว Valery (AAA group) (Kayisu *et al.*, 1980) มีรูปร่างยาวรี และจำนวนเมื่อดูที่มีรูปร่างกลมน้อย ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นลักษณะที่คล้ายคลึงกับงานวิจัย จึงอาจตั้งข้อสันนิษฐานได้ว่า เมื่อดูดาวจากกล้วยสายพันธุ์เดียวกันน่าจะมีรูปร่างของเมื่อดูดาวคล้ายกัน การศึกษาลักษณะของเมื่อดูดาวจึงสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเบื้องต้นเพื่อแยกความแตกต่างของกล้วยแต่ละสายพันธุ์ได้

2.3 ขนาดของเมื่อดูดาว

เมื่อพิจารณาจากลักษณะรูปร่าง ของเมื่อดูดาวจากกล้วยทั้ง 3 สายพันธุ์ พบว่า มีความแตกต่างกันทั้งในพันธุ์เดียวกัน และต่างสายพันธุ์ จึงส่งผลให้เมื่อดูดาวมีขนาดต่าง ๆ กันด้วย ขนาดของเมื่อดูดาวจากกล้วยทั้ง 3 พันธุ์ แสดงดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ขนาดของเมื่อดสตาร์ชจากกล้วย 3 สายพันธุ์

(หน่วย: ไมโครเมตร)

ตัวอย่าง	ขนาด ^{1/}	
	ด้านกว้าง	ด้านยาว
NWS	18-30	40-45
HTS	10-15	47-60
KHS	12-30	32-55

หมายเหตุ ^{1/} ค่าเฉลี่ยจากการวัด 60 หน่วยต่อตัวอย่าง โดยทำการวัดทางด้านยาว และด้านกว้างของแต่ละหน่วยเมื่อดสตาร์ช

^{2/} ตัวเลขหลัง $\pm$ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล

ขนาดของเมื่อดสตาร์ชจากกล้วยทั้ง 3 พันธุ์แสดงในลักษณะเป็นช่วง โดยเป็นค่าเฉลี่ยของด้านกว้าง ด้านยาว โดย NWS จะมีขนาดเฉลี่ยของด้านกว้างอยู่ในช่วง 18-30 ไมโครเมตร และด้านยาวอยู่ในช่วง 40-45 ไมโครเมตร HTS มีขนาดเฉลี่ยของด้านกว้าง 10-15 ไมโครเมตร และด้านยาวอยู่ในช่วง 47-60 ไมโครเมตร ส่วน KHS มีขนาดเฉลี่ยของด้านกว้างอยู่ในช่วง 12-30 ไมโครเมตร และด้านยาวอยู่ในช่วง 32-55 ไมโครเมตร ซึ่งเมื่อพิจารณาขนาดเฉลี่ยทั้งด้านกว้าง และด้านยาวของเมื่อดสตาร์ชทั้ง 3 ชนิด พบว่า HTS จะมีขนาดของด้านยาวโดยเฉลี่ย มากกว่าขนาดด้านยาวของ NWS และ KHS แต่พบว่าขนาดเฉลี่ยของด้านกว้างของเมื่อด HTS มีค่าน้อยกว่าด้านกว้างของ NWS และ KHS เมื่อเปรียบเทียบขนาดของเมื่อดสตาร์ชจากกล้วยที่ได้จากงานวิจัย กับสตาร์ชที่ได้จากพืชชนิดอื่น พบว่าสตาร์ชจากกล้วยมีขนาดค่อนข้างใหญ่ โดยมีขนาดใหญ่กว่า สตาร์ชจากข้าวเจ้า (3-5 ไมโครเมตร) และสตาร์ชข้าวโอ๊ต (5-8 ไมโครเมตร) และมีขนาดเฉลี่ยใกล้เคียงกับสตาร์ชข้าวฟ่าง (15-35 ไมโครเมตร) ซึ่งเป็นเมล็ดธัญพืช และสตาร์ชมันสำปะหลัง (5-35 ไมโครเมตร) ซึ่งเป็นสตาร์ชที่ได้จากส่วนรากของพืช แต่มีขนาดเล็กกว่าสตาร์ชจากมันฝรั่ง (15-121 ไมโครเมตร) (กล้านรงค์ และเกื้อกูล, 2546) การที่เมื่อดสตาร์ชของกล้วยแต่ละพันธุ์มีความแตกต่างกัน ทั้งขนาด และรูปร่าง มีสาเหตุมาจากลักษณะของพันธุกรรมที่แตกต่างกัน (Svegmark and Hermansson, 1993) โดยลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเมื่อดสตาร์ชจากพืชแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับ กระบวนการทางชีวเคมีของ คลอโรพลาสต์ (chloroplast) หรือ

แอมิโลพลาส (amyloplast) ของพืชชนิดนั้น ๆ (Wang *et al.*, 2006) นอกจากนี้ ลักษณะสัณฐานวิทยาของเมล็ดสตาร์ช ยังเป็นสมบัติของเฉพาะสตาร์ชจากพืชแต่ละชนิดที่มีความสำคัญ เนื่องจากเป็นสมบัติที่สามารถส่งผลให้เกิดความแตกต่างของสมบัติของสตาร์ชด้านอื่น ๆ เช่น ปริมาณแอมิโลส ความสามารถในการละลาย และการพองตัว ความสามารถในการอุ้มน้ำ เป็นต้น (Kaur *et al.*, 2002; Singh and Singh, 2001; and Zhou *et al.*, 1998). ซึ่งการที่สตาร์ชกล้วยแต่ละพันธุ์มีลักษณะของเมล็ดสตาร์ชที่หลากหลาย จึงอาจจะส่งผลให้เกิดความแตกต่างของสมบัติด้านอื่นด้วยเช่นกัน

3 สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์

3.1 กำลังการพองตัว และความสามารถในการละลาย

สตาร์ชโดยทั่วไป จะไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาทิไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ชที่อยู่ใกล้ ๆ กันเชื่อมต่อกันอยู่ (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2546) เมื่อมีการให้ความร้อน และมีปริมาณน้ำมากเกินพอ พันธะที่ยึดเหนี่ยวจะอ่อนแอลง ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำแพร่เข้าไปในเมล็ดสตาร์ช เกิดการพองตัว และการละลาย ทำให้สมบัติต่าง ๆ ที่มีอยู่ของสตาร์ชชนิดนั้น ๆ เปลี่ยนไป เช่น การเปลี่ยนแปลงความหนืด หรือเกิดกระบวนการเจลาทิไนเซชัน ซึ่งเป็นผลมาจากโครงร่างผลึก และแรงยึดเหนี่ยวภายในโมเลกุลของสตาร์ชมีการเปลี่ยนแปลง (Phillips and Williams, 2000)

3.1.1 กำลังการพองตัว

สตาร์ชแต่ละชนิด มีรูปแบบการพองตัวและการละลายที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวของพันธะภายในโมเลกุล ความแข็งแรงของโครงร่างผลึกและองค์ประกอบภายในที่ส่งผลต่อแรงยึดเหนี่ยวของพันธะ กำลังการพองตัวของแป้ง และสตาร์ชจากกล้วย 3 สายพันธุ์ แสดงเป็นน้ำหนักของแป้ง หรือสตาร์ชที่เพิ่มขึ้นมากที่สุด เมื่อเมล็ดสตาร์ชมีการดูดน้ำ และเกิดพองตัวได้อย่างอิสระที่อุณหภูมิที่กำหนด กำลังการพองตัวของตัวอย่างของแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยทั้ง 3 พันธุ์ ที่อุณหภูมิ 55, 65, 75, 85 และ 95 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 13

จากตารางที่ 13 ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส กำลังการพองตัวของ NWF, HTF และ KHF มีค่าเท่ากับ 5.82, 6.02 และ 5.65 กรัม/กรัม น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง ตามลำดับ ($p > 0.05$)

ในขณะที่ NWS, HTS และ KHS มีค่าการพองตัว เท่ากับ 3.35, 3.27 และ 3.83 กรัม/กรัมน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง ตามลำดับ ($p>0.05$) เมื่อเปรียบเทียบค่าการพองตัวของแป้ง และสตาร์ชกล้วยทั้ง 3 สายพันธุ์ พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$)

ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส KHF มีค่าการพองตัวสูงกว่า NWF และ HTF คือ 6.51, 6.46 และ 6.15 กรัม/กรัมน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง ($p>0.05$) เมื่อพิจารณาในกลุ่มของสตาร์ช พบว่า NWS และ KHS มีค่าการพองตัว 3.28 และ 4.19 กรัม/กรัมน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง ($p>0.05$) ซึ่งมีค่าต่ำกว่า HTS ที่มีค่าการพองตัวเท่ากับ 5.08 กรัม/กรัมน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง ($p\leq 0.05$)

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 75 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 13) ปรากฏว่า KHF มีค่าการพองตัวสูงกว่า NWF และ HTF คือ 6.89, 6.79 และ 6.65 กรัม/กรัมน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง ตามลำดับ ($p>0.05$) ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) กับค่าการพองตัวของสตาร์ชจากกล้วยสายพันธุ์เดียวกัน เมื่อพิจารณาในกลุ่มของสตาร์ช พบว่า HTS มีค่าการพองตัว (6.05 กรัม/กรัมน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง) สูงกว่า KHS (5.21 กรัม/กรัมน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง) และ NWS (4.81 กรัม/กรัมน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง) ($p\leq 0.05$) โดยในทุกตัวอย่างมีค่าการพองตัวเพิ่มขึ้นจากที่ระดับอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

ที่ระดับอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส พบว่าในกลุ่มของแป้ง HTF มีค่าการพองตัว (13.06 กรัม/กรัมน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง) ซึ่งต่ำกว่า NWF และ KHF (14.16 และ 13.10 กรัม/กรัม น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง ตามลำดับ) ($p>0.05$) เมื่อพิจารณาในกลุ่มของสตาร์ช พบว่า HTS มีค่าการพองตัวสูงกว่า KHS และ NWS เท่ากับ 17.01, 15.86 และ 15.39 กรัม/กรัมน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง ($p>0.05$) ซึ่งมีค่าการพองตัวสูงกว่าตัวอย่างแป้งในสายพันธุ์เดียวกันทุกตัวอย่าง และมีค่าสูงขึ้นจากระดับอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 13 กำลังการพองตัวของแป้ง และสสารชักล้วย ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

(หน่วย: กรัม/กรัมน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง)

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ^{1/, 2/}				
	55	65	75	85	95
NWF	5.82 ± 0.088 b	6.46 ± 0.389 c	6.79 ± 0.510b c	14.16 ± 1.687 a	16.80 ± 1.885 a
HTF	6.02 ± 0.101 b	6.15 ± 0.441 bc	6.51 ± 0.659 c	13.06 ± 0.392 a	16.21 ± 0.700 a
KHF	5.95 ± 0.078 b	6.65 ± 0.415 c	6.89 ± 0.273 c	13.10 ± 0.450 a	16.02 ± 0.561 a
NWS	3.35 ± 0.518 a	3.82 ±0.200 a	4.81±0.1889 a	15.39 ±0.160 b	23.49 ±0.921 b
HTS	3.27 ± 0.359 a	5.08 ± 1.075 b	6.05 ± 1.053 b	17.01 ± 1.147 c	29.42 ± 0.956 d
KHS	3.83 ± 0.785 a	4.19 ± 0.402 a	5.21 ± 0.414 a	15.89 ± 0.529 bc	27.24 ± 0.411 c

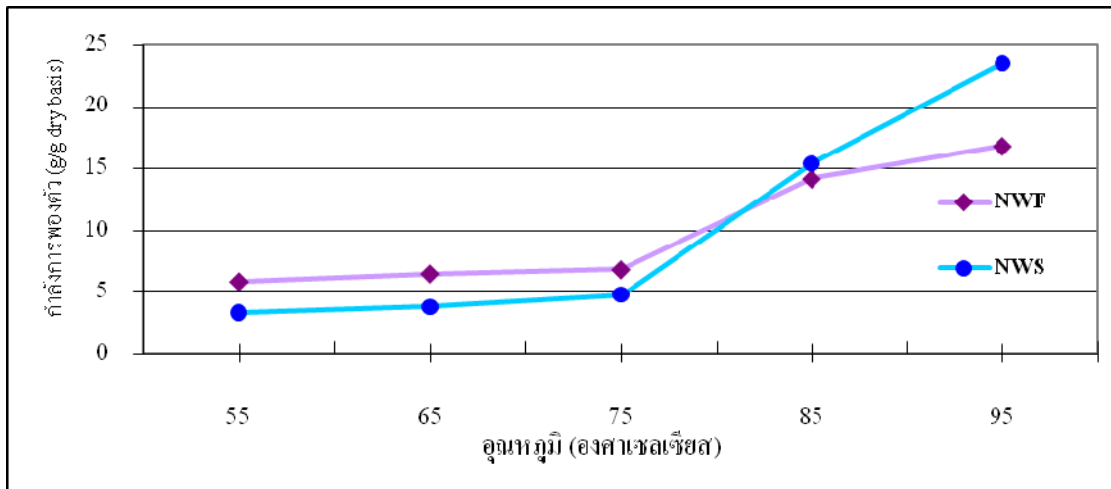
หมายเหตุ ^{1/} เป็นค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำจาก 2 ตัวอย่าง

^{2/} อักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง มีความแตกต่างกันทางสถิติ (p ≤0.05)

^{3/} ตัวเลขหลัง ± คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล

ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส แป้ง และสตาร์ชจะมีค่ากำลังการพองตัวสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับระดับอุณหภูมิอื่น ๆ (ตารางที่ 13) โดยปรากฏผลว่า NWF มีค่ากำลังการพองตัวสูงกว่า HTF และ KHF เท่ากับ 16.80, 16.21 และ 16.02 กรัม/กรัมน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง ($p > 0.05$) อีกทั้งยังมีค่าต่ำกว่า ($p \leq 0.05$) สตาร์ชในสายพันธุ์เดียวกันทั้งสามชนิด เมื่อพิจารณาสตาร์ชจากกล้วยแต่ละพันธุ์พบว่า มีค่ากำลังการพองตัวแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดย HTS มีค่ากำลังการพองตัวสูงที่สุด เท่ากับ 29.42 กรัม/กรัมน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง ส่วน KHS มีค่ากำลังการพองตัวเท่ากับ 27.24 กรัม/กรัมน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง และ NWS ซึ่งมีค่ากำลังการพองตัวน้อยที่สุด เท่ากับ 23.49 กรัม/กรัมน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง

รูปแบบของกำลังการพองตัวของแป้งและสตาร์ชจากกล้วยพันธุ์น้ำว่า แสดงดังภาพที่ 28 (พันธุ์หอมทอง และพันธุ์ไข่ แสดงในภาคผนวก ง) จากผลการตรวจสอบ พบว่า กราฟมีลักษณะของการพองตัวที่จำกัด (restricted swelling) โดยสังเกตจากเส้นกราฟในช่วงแรก (อุณหภูมิ 55-75 องศาเซลเซียส) ที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อย รูปแบบการพองตัว ในลักษณะนี้ แสดงถึงแรงของพันธะภายในเม็ดสตาร์ชที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ แรงของพันธะบริเวณผลึก (crystalline) และแรงของพันธะบริเวณอสัณฐานของเม็ดสตาร์ช (amorphous) ซึ่งพันธะบริเวณผลึกจะถูกทำลายได้ยากกว่า (กล้านรงค์และเกื้อกุล, 2546) ดังนั้น จึงสันนิษฐานว่า น่าจะเป็นผลมาจากการพันธะบริเวณผลึกมีความแข็งแรง พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิดังกล่าว ไม่สามารถทำลายโครงสร้างผลึกของตัวอย่างได้ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น (อุณหภูมิ 75-95 องศาเซลเซียส) พันธะที่ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล โดยเฉพาะพันธะไฮโดรเจนจะอ่อนแอ และถูกทำลายได้มากขึ้น และโมเลกุลของน้ำจึงสามารถแพร่เข้าไปในเม็ดสตาร์ชได้เร็วขึ้น การพองตัวของตัวอย่างจึงมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ ลักษณะที่มีการพองตัวแบบจำกัดนี้อาจเป็นผลมาจากสมบัติในการเป็น resistant starch ของตัวอย่างแป้งและสตาร์ชจากกล้วยดิบ ซึ่งเป็น resistant starch แบบที่ 2 (RS₂) ซึ่ง RS₂ นี้ เป็น resistant starch ที่มีการจัดเรียงโมเลกุลของสตาร์ช ในส่วนของโครงสร้างผลึก (crystalline) ที่หนาแน่น และเป็นระเบียบมาก ทำให้มีความแข็งแรงของพันธะที่ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมาก จึงต้องใช้อุณหภูมิสูงเพื่อทำให้ความแข็งแรงพันธะดังกล่าวอ่อนแอลง (Thompson, 2000)



ภาพที่ 28 กราฟแสดงค่าการพองตัวของ NWF และ NWS ที่อุณหภูมิ 55, 65, 75, 85 และ 95 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาในกลุ่มสสาร พบว่ามีการพองตัวแตกต่างกัน จากตารางองค์ประกอบทางเคมี (ตารางที่ 8) พบว่า ปริมาณแอมโมเนียของกล้วยพันธุ์น้ำว้า (NW) มีค่าสูงสุด รองลงมาคือไข่ (KH) และ หอมทอง (HT) ดังนั้น ปริมาณแอมโมเนียจึงมีความสัมพันธ์กับค่าการพองตัวของตัวอย่าง จากงานวิจัยของ Morrison *et al.*, (1993) พบว่า สัดส่วนของปริมาณแอมโมเนีย และ แอมโมเนียเพกตินมีผลต่อค่าการพองตัว โดยสสารที่มีปริมาณแอมโมเนียต่ำ จะมีค่าการพองตัวสูง (กล้วยพันธุ์ และเกลือ, 2546; Williams, 1968; Whistler and BeMiller, 1999) สำหรับกลุ่มแป้งพบว่า ค่าการพองตัวไม่ได้มีแนวโน้มเดียวกันกับสสาร โดยมีค่าการพองตัวใกล้เคียงกัน แต่มีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) อาจเนื่องมาจากองค์ประกอบทางเคมีของแป้งกล้วยที่ไม่ใช่ปริมาณแอมโมเนีย โดยพบว่า HTF มีปริมาณไขมันสูง ในขณะที่ NWF มีปริมาณโปรตีนสูง (ตารางที่ 8) ซึ่งจากงานวิจัยของ Harmaker and Griffin (1993) และ Morrison *et al.*, (1993) พบว่า ปริมาณโปรตีน และไขมัน มีผลต่อค่าการพองตัวของสสาร

3.1.2 ความสามารถในการละลาย

การละลาย ของแป้ง และสสารจากกล้วยดิบทั้ง 3 สายพันธุ์ แสดงเป็นน้ำหนัก (ร้อยละ) ของของแข็งทั้งหมดในสารละลาย

จากตารางที่ 14 การละลายที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสของ NWF (ร้อยละ 5.02) มีค่าต่ำกว่า KHF และ HTF (ร้อยละ 6.31 และ 6.18 ตามลำดับ) ($p \leq 0.05$) เมื่อพิจารณาในกลุ่มสสาร พบว่า สสารกล้วย NWS, HTS และ KHS มีค่าการละลายใกล้เคียงกัน คือ ร้อยละ 0.35, 0.38 และ 0.36 ตามลำดับ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบการละลายระหว่างแป้ง กับสสารจากกล้วยสายพันธุ์เดียวกัน พบว่า แป้งกล้วยมีค่าการละลายสูงกว่าสสารในทุกตัวอย่าง

ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ความสามารถในการละลายของ KHF มีค่าใกล้เคียงกับ HTF และ NWF คือ ร้อยละ 5.16, 5.00 และ 4.97 ($p > 0.05$) ตามลำดับ และมีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับสสารในสายพันธุ์เดียวกันทั้งสามชนิด เมื่อพิจารณาในกลุ่มสสาร พบว่า สสารทั้งสามชนิดมีค่าการละลายไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) โดย NWS, HTS และ KHS มีค่าการละลายร้อยละ 0.31, 0.39 และ 0.32 ตามลำดับ (ตารางที่ 14)

ความสามารถในการละลายของตัวอย่างแป้ง และสสารจากกล้วยดิบ ที่ระดับอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 14 พบว่ากล้วยหอมทองมีค่าการละลาย ร้อยละ 6.00 ซึ่งใกล้เคียงกับ NWF (ร้อยละ 5.72) และ KHF (ร้อยละ 5.59) ($p > 0.05$) แป้งกล้วยในแต่ละสายพันธุ์จะมีค่าการละลายมากกว่าสสารในสายพันธุ์เดียวกัน ($p \leq 0.05$) เมื่อพิจารณาในกลุ่มสสาร พบว่า สสารทั้งสามชนิด คือ NWS HTS และ KHS มีค่าการละลายเท่ากับ ร้อยละ 0.39, 0.52 และ 0.49 ตามลำดับ ($p > 0.05$)

ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ปรากฏค่าการละลายของแป้งกล้วยดิบทั้งสามชนิดมีค่าแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เรียงลำดับจากการละลายน้อยที่สุดได้ดังนี้ คือ NWF (ร้อยละ 11.16), KHF (ร้อยละ 14.07) และ HTF (ร้อยละ 14.88) โดย HTF เป็นตัวอย่างที่มีค่าการละลายสูงที่สุด (ตารางที่ 14) นอกจากนี้ ตัวอย่างในกลุ่มแป้งจะมีค่าการละลายมากกว่า และมีค่าแตกต่างทางสถิติ

($p \leq 0.05$) กับตัวทุกอย่างในกลุ่มสตาร์ช เมื่อพิจารณาในกลุ่มสตาร์ชจากกล้วยดิบ พบว่า HTS (ร้อยละ 8.99) มีค่าการละลายสูงกว่า NWS และ KHS (ร้อยละ 7.67 และ 7.80 ตามลำดับ ($p \leq 0.05$))

ค่าร้อยละการละลายของทุกตัวอย่างที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส มีค่าสูงสุด และแป้งจากกล้วยทั้งสามพันธุ์ มีค่าการละลายแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดย NWF มีค่าการละลายเท่ากับ ร้อยละ 17.09 KHF ร้อยละ 21.12 และ HTF ซึ่งมีค่าการละลายสูงสุด เท่ากับร้อยละ 22.97 ส่วนตัวอย่างในกลุ่มสตาร์ชพบว่า NWS มีค่าการละลายร้อยละ 12.65 ซึ่งต่ำกว่า KHS ที่มีการละลายร้อยละ 12.82 ($p > 0.05$) และมีค่าแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับ HTS ที่มีค่าการละลายสูงที่สุด (ร้อยละ 16.49) (ตารางที่ 14)

เมื่อพิจารณาแต่ละตัวอย่าง พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าการละลายของทุกตัวอย่างจะเพิ่มขึ้นด้วย โดยค่าร้อยละการละลายของตัวอย่างแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยดิบ 3 สายพันธุ์ แสดงดังตารางที่ 14 พบว่า การละลายของแป้งจะมีค่ามากกว่า การละลายของสตาร์ชจากกล้วยดิบทั้งสามชนิด ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากสิ่งเจือปนอื่นในแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต เช่น โปรตีน หรือ องค์ประกอบอื่น ๆ ที่สามารถละลายน้ำได้ ละลายปนออกมาด้วย ทำให้ได้ค่าการละลายที่สูงกว่าสตาร์ช (Hoover and Senayake, 1996; Tester and Morrison, 1990)

จากภาพที่ 29 พบว่า รูปแบบการละลายของตัวอย่างแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยน้ำว้า (NWF และ NWS) มีลักษณะคล้ายคลึงกับรูปแบบการพองตัว (สายพันธุ์อื่น ๆ แสดงดังภาคผนวก ง) กล่าวคือ มีรูปแบบการละลายแบบจำกัด มีการละลายน้อยที่อุณหภูมิ 55-75 องศาเซลเซียส และมีการละลายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 75-95 องศาเซลเซียส ลักษณะเช่นนี้ อาจเนื่องมาจาก ที่อุณหภูมิต่ำ พลังงานความร้อนไม่สามารถทำลายพันธะที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ชได้ จึงทำให้มีเพียงองค์ประกอบที่สามารถละลายน้ำได้เท่านั้นที่สามารถละลายออกมาในช่วงอุณหภูมินี้ได้ ในขณะที่ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้มีพลังงานความร้อนที่สามารถทำให้พันธะที่ยึดเหนี่ยวในโมเลกุลของสตาร์ชอ่อนแอลงได้ ทำให้โมเลกุลดังกล่าวสามารถแพร่ออกมานอกเม็ดสตาร์ชได้มากขึ้น จึงมีผลทำให้มีการละลายเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 14 การละลายของแป้ง และสสารขกส่าย ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

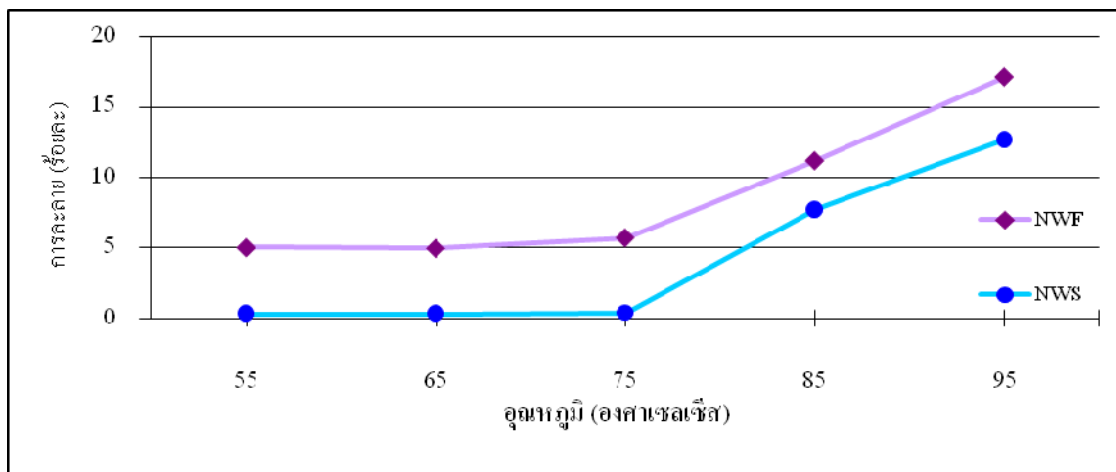
(หน่วย: ร้อยละ)

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ^{1/, 2/}				
	55	65	75	85	95
NWF	5.02 ± 0.469 b	4.97 ± 0.379 b	5.72 ± 0.489 b	11.16 ± 0.777 c	17.09 ± 0.437 b
HTF	6.18 ± 0.100 c	5.00 ± 0.557 b	6.00 ± 0.258 b	14.88 ± 0.326 e	22.97 ± 1.688 d
KHF	6.31 ± 1.403 c	5.16 ± 0.358 b	5.59 ± 0.780 b	14.07 ± 0.113 d	21.12 ± 0.888 c
NWS	0.35 ± 0.163 a	0.31 ± 0.044 a	0.39 ± 0.037 a	7.67 ± 0.400 a	12.65 ± 0.435 a
HTS	0.38 ± 0.066 a	0.39 ± 0.060 a	0.52 ± 0.040 a	8.99 ± 0.0598 b	16.49 ± 2.060 b
KHS	0.34 ± 0.043 a	0.32 ± 0.029 a	0.49 ± 0.018 a	7.80 ± 0.401 a	12.82 ± 0.283 a

หมายเหตุ ^{1/} เป็นค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำจาก 2 ตัวอย่าง

^{2/} อักษรที่ต่างกันในแนวนอน มีความแตกต่างกันทางสถิติ (p≤0.05)

^{3/} ตัวเลขหลัง ± คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล



ภาพที่ 29 กราฟแสดงร้อยละของการละลายของตัวอย่าง NWF และ NWS ที่อุณหภูมิ 55, 65, 75, 85 และ 95 องศาเซลเซียส

3.2 สมบัติเชิงความร้อน

สมบัติเชิงความร้อนของตัวอย่างแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยสามสายพันธุ์ซึ่งวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง DSC ที่อาศัยหลักการวัดความแตกต่างของพลังงานที่ตัวอย่างดูดเข้าไปเพื่อทำการสลายพันธะในระหว่างกระบวนการเกิดเจลลิตีในเซชัน ซึ่งเป็นกระบวนการประเภทดูดกลืนความร้อน (endothermic) และมีพีคของการดูดกลืนดังกล่าว เป็นพีคเดี่ยว (single endotherm peak) ค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดปฏิกิริยาของตัวอย่าง (T_o : onset temperature), อุณหภูมิที่ทำให้เกิดปฏิกิริยามากที่สุด (T_p : peak temperature) อุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยา (T_c : conclusion temperature) พบว่า ตัวอย่างมีช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชัน (T_o - T_p - T_c) แตกต่างกัน

3.2.1 สมบัติเชิงความร้อนในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน

ก) ผลของความแตกต่างของสายพันธุ์กล้วยต่อช่วงอุณหภูมิการเกิด
เจลลาทีโนเซชัน

การเกิดเจลลาทีโนเซชันของตัวอย่างแป้ง และสตาร์ชจากกล้วย 3 สายพันธุ์
แสดงดังตารางที่ 15 ดังนี้

ตารางที่ 15 สมบัติเชิงความร้อนในการเกิดเจลลาทีโนเซชันของแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยสามพันธุ์โดย
การตรวจสอบด้วยเครื่อง DSC

ตัวอย่าง	สมบัติเชิงความร้อนในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน ^{2/, 3/}			
	T _o	T _p (องศาเซลเซียส)	T _c	เอนทัลปี(ΔH) (จูลต่อน้ำหนักแห้ง)
NWF	76.27 ± 0.120 d	80.35 ± 0.239 e	85.99 ± 0.430 d	15.54 ± 1.652 ab
HTF	73.44 ± 0.483 c	77.21 ± 0.894 c	81.79 ± 1.298 c	15.92 ± 1.016 ab
KHF	73.96 ± 0.827 c	78.70 ± 0.973 d	86.18 ± 1.762 d	15.16 ± 1.489 a
NWS	73.50 ± 0.484 c	76.54 ± 0.641 c	81.50 ± 0.837 bc	19.62 ± 3.015 c
HTS	70.70 ± 0.117 a	73.91 ± 0.196 a	78.20 ± 0.323 a	18.84 ± 2.582 bc
KHS	72.48 ± 0.563 b	75.28 ± 0.502 b	80.24 ± 0.696 b	18.58 ± 2.496 abc

หมายเหตุ ^{1/} ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ โดยตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง มีความแตกต่างกันทางสถิติ (p≤0.05)

^{2/} ตัวเลขหลังเครื่องหมาย ± คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

1) อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลิตีในเซชัน (T_o)

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลิตีในเซชันของตัวอย่างในกลุ่มแป้ง พบว่า HTF, KHF และ NWF มีค่าเท่ากับ 73.44, 73.96 และ 76.27 องศาเซลเซียส ตามลำดับซึ่งเมื่อพิจารณาอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลิตีในเซชันในกลุ่มสตาร์ช พบว่า HTS, KHS และ NWS มีอุณหภูมิเริ่มต้นเกิดเจลลิตีในเซชัน 70.70, 72.48 และ 73.50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างในกลุ่ม แป้ง สตาร์ช และ แป้ง พบว่า ตัวอย่างในกลุ่มของ แป้ง จะมีอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลิตีในเซชัน สูงกว่าในกลุ่มสตาร์ชที่เป็นสายพันธุ์เดียวกัน (ตารางที่ 15)

2) อุณหภูมิที่มีการเกิดเจลลิตีในเซชันมากที่สุด (T_p)

แป้งและสตาร์ชจากกล้วยแสดงลักษณะแนวโน้มคล้ายคลึงกับอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลิตีในเซชัน โดยทั้งในกลุ่มแป้ง และสตาร์ชมีลำดับจากน้อยไปมากเหมือนกัน คือ กล้วยหอมทอง กล้วยไข่ และกล้วยน้ำว้า โดยในกลุ่มแป้ง อุณหภูมิที่มีการเกิดเจลลิตีในเซชันมากที่สุดของ HTF, KHF และ NWF มีค่าเท่ากับ 77.21, 78.70 และ 80.35 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่กลุ่มสตาร์ช อุณหภูมิที่มีการเกิดเจลลิตีในเซชันมากที่สุดของ HTS, KHS และ NWS เท่ากับ 73.91, 75.28 และ 76.54 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ($p \leq 0.05$)

3) อุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลลิตีในเซชัน (T_c)

แนวโน้มของอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลลิตีในเซชัน มีลักษณะคล้ายคลึงกับอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลิตีในเซชัน และอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเจลลิตีในเซชันสูงสุด คือ ในกลุ่มแป้ง HTF เป็นตัวอย่างที่มีค่าอุณหภูมิต่ำที่สุด (81.79 องศาเซลเซียส) ซึ่งมีค่าแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับ NWF (85.99 องศาเซลเซียส) ในขณะที่ KHF (86.18 องศาเซลเซียส) มีค่าใกล้เคียงกับ NWF ($p > 0.05$) เมื่อพิจารณาตัวอย่างในกลุ่มสตาร์ช พบว่า HTS มีค่าต่ำที่สุด (72.80 องศาเซลเซียส) ซึ่งมีค่าแตกต่างทางสถิติกับ KHS และ NWS (80.24 และ 81.50 องศาเซลเซียส) ($p \leq 0.05$)

จากค่าที่วิเคราะห์ทั้งหมด พบว่า ช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลในเซชัน (To-Tp-Tc) ของสตาร์ชจากกล้วยมีค่าต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลในเซชันของแป้งกล้วย เมื่อเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิในช่วงต่าง ๆ ดังกล่าว พบว่าตัวอย่างแต่ละพันธุ์มีช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลในเซชันต่างกัน อาจเป็นผลเนื่องมาจากความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างแต่ละชนิด เช่น ปริมาณและสัดส่วนของแอมิโลส และแอมิโลเพกทิน จากตารางค่าองค์ประกอบทางเคมี (ตารางที่ 8) พบว่า HTS, KHS และ NWS ซึ่งมีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 13.36, 20.32 และ 28.03 ตามลำดับ สันนิษฐานได้ว่าช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลในเซชันเพิ่มขึ้นตามปริมาณแอมิโลสที่เพิ่มขึ้นด้วย สอดคล้องกับการทดลองของ Eggleston *et al.* (1992) พบว่า ตัวอย่างกล้วย (cooking banana) ที่มีปริมาณแอมิโลส ร้อยละ 17.16 ให้ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลในเซชันสูงกว่า (66.7-67.5-68.7 องศาเซลเซียส) ตัวอย่างกล้วยกล้วย (Plantain hybrids) และกล้วย (Plantains) ที่มีปริมาณแอมิโลสประมาณร้อยละ 10-12 (61.2-63.3-67.3 องศาเซลเซียส) ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าปริมาณแอมิโลสเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลในเซชันของตัวอย่างมีความแตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับ Knutson (1990) ที่พบว่าตัวอย่างข้าวโพดที่มีปริมาณแอมิโลสเพิ่มสูงขึ้น จะมีช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลในเซชันเพิ่มขึ้นด้วย การที่ปริมาณแอมิโลสมีผลต่อช่วงของอุณหภูมิเจลในเซชัน เนื่องจากลักษณะโครงสร้างความเป็นผลึกของโมเลกุลที่มีปริมาณแอมิโลสแตกต่างกัน สตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ จะมีลักษณะความเป็นผลึกสูงกว่าสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสสูง และส่งผลต่อความสามารถในการพองตัวของสตาร์ช ซึ่งจากผลการวิเคราะห์นี้สอดคล้องกับผลการทดลองในส่วนของการพองตัวและการละลายของตัวอย่าง (ตารางที่ 13 และ 14) โดยตัวอย่างที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำจะเกิดการพองตัวสูง จะเริ่มเกิดเจลในเซชันก่อน

4) ค่าเอนทัลปี (Enthalpy: ΔH)

ค่าเอนทัลปี หรือผลรวมค่าพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึก เป็นค่าที่ใช้บอกถึงปริมาณ หรือคุณภาพของผลึก ปริมาณเกลียวคู่ของแอมิโลเพกทิน ใช้บอกการสูญเสียความเป็นผลึกในเมล็ดสตาร์ช และเป็นพลังงานรวมที่ใช้ในการทำลายพันธะไฮโดรเจน และแรงแวนเดอร์วาลส์ (Morrison and Azudin, 1987; Tester 1997; Singh *et al.*, 2003) จากตารางที่ 15 ผลรวมค่าพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกของตัวอย่างแป้งกล้วยทั้ง 3 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน โดย NWS มีค่าพลังงาน 15.54 จูลต่อน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$) กับ HTF และ KHF (15.92 และ

15.16 จุลต่อน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง ตามลำดับ) เมื่อพิจารณาในกลุ่มของสตาร์พบว่า ค่าพลังงานรวมในการสลายพันธะมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติเช่นเดียวกัน ($p>0.05$) โดย NWS HTS และ KHS มีค่าเท่ากับ 19.62, 18.84, 18.58 จุลต่อน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง ตามลำดับ ค่าพลังงานรวมที่ใช้ในการสลายโครงสร้างผลึก แสดงถึงความแข็งแรงของพันธะภายในโมเลกุลของตัวอย่าง ปัจจัยที่ทำให้ตัวอย่างมีความแข็งแรงของพันธะแตกต่างกัน คือ ปริมาณของแอมิโลส ชนิด, ลักษณะการจัดเรียงตัวของผลึก รวมถึงการเกิดอันตรกิริยากับองค์ประกอบอื่น ๆ ในแป้ง โดยถ้าตัวอย่างมีปริมาณแอมิโลสสูงการจัดเรียงตัวของโมเลกุลมีความเป็นระเบียบมาก จะทำให้มีช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลในเซชันกว้าง แสดงว่าใช้พลังงานในการสลายพันธะมาก (Hoover and Senanayake, 1996)

ข) ผลขององค์ประกอบทางเคมีต่อการเกิดเจลในเซชันของตัวอย่าง

เมื่อเปรียบเทียบช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลในเซชัน และค่าพลังงานรวมในการสลายโครงสร้างผลึกของตัวอย่าง ระหว่างแป้ง และสตาร์ชของตัวอย่างกล้วยพันธุ์เดียวกัน พบว่าตัวอย่างแป้งกล้วยทุกสายพันธุ์จะมีอุณหภูมิเริ่มต้น, อุณหภูมิที่จุดสูงสุด และอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลในเซชันสูงกว่าสตาร์ช แต่มีค่าพลังงานรวมที่ใช้สลายโครงสร้างผลึกที่ต่ำกว่า เนื่องมาจากปริมาณแอมิโลสของแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยในสายพันธุ์เดียวกัน มีค่าไม่เท่ากัน โดยตัวอย่างแป้ง และสตาร์ชที่มีน้ำหนักเท่ากัน แป้งจะมีทั้งสตาร์ช และองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ในขณะที่สตาร์ชจะมีองค์ประกอบหลักเป็นแอมิโลส และแอมิโลเพกทิน ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณแอมิโลสในตัวอย่างแป้งมีน้อยกว่าในตัวอย่างสตาร์ช นอกจากนี้องค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ได้แก่ โปรตีน, ไขมัน และปริมาณฟอสฟอรัส (วสันต์, 2543; Hamaker and Griffin, 1993; Hoover and Senanayake, 1996) ที่สามารถขัดขวางความเป็นโครงสร้างผลึก หรือส่วนที่เป็นโครงสร้างผลึกของโมเลกุลสตาร์ชได้ ทำให้แป้งมีส่วนที่เป็นผลึกน้อยกว่าสตาร์ช ซึ่งโปรตีนสามารถสร้างพันธะไคซัลไฟด์กับโมเลกุลของสตาร์ชทำให้เม็ดสตาร์ช (Hamaker and Griffin, 1993) ส่วนไขมันจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลของแอมิโลส ดังนั้นจึงทำให้ตัวอย่างแป้งใช้พลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกน้อยกว่า และส่งผลให้ผลรวมของค่าพลังงานที่ใช้มีน้อยกว่าในกลุ่มของสตาร์ช

3.2.2 สมบัติเชิงความร้อนในการเกิดรีโทรเกรเดชัน

เมื่อลดอุณหภูมิของเจลแข็ง และสตาร์ชลง และเก็บรักษาไว้ในระยะเวลาหนึ่ง จะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลของเอมิโลสและเอมิโลเพกทิน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (กลั่นรงค์ และเกื้อกูล, 2546)

ช่วงอุณหภูมิของการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแข็ง และสตาร์ชจากกล้วยทั้งสามพันธุ์ ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการเก็บรักษา 7 และ 21 วัน แสดงดังตารางที่ 16 พบว่าที่ระยะเวลาในการเก็บรักษา 7 และ 21 วัน ตัวอย่างเจลแข็ง และสตาร์ช มีอุณหภูมิเริ่มต้น, อุณหภูมิสูงสุด, และอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยา มีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

ก) ผลของความแตกต่างของสายพันธุ์กล้วยต่อช่วงอุณหภูมิการเกิดรีโทรเกรเดชัน

1) อุณหภูมิเริ่มต้นที่เกิดการสลายโครงสร้างผลึก (RT_0)

ที่ระยะเวลาการเก็บ 7 วัน เมื่อพิจารณาในกลุ่มของแข็งพบว่า มีอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดการสลายโครงสร้างผลึก (RT_0) ของ KHF, HTF และ NWS คือ 44.46 45.35 และ 44.57 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ RT_0 ในกลุ่มของเจล KHS, HTS และ NWS คือ 44.57, 44.67 และ 44.74 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อเก็บไว้เป็นเวลา 21 วัน ค่า RT_0 ของเจลแข็งและเจลสตาร์ชมีค่าใกล้เคียงกับการเก็บรักษา 7 วัน โดยแข็งที่ระยะเวลาการเก็บ 21 วัน มีค่า RT_0 ของ HTF, KHF และ NWF เท่ากับ 43.67, 44.56, 44.59 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนกลุ่มของสตาร์ชมี RT_0 ของ HTS, NWS และ KHS เท่ากับ 44.13, 44.37 และ 46.20 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

2) อุณหภูมิที่เกิดการสลายโครงร่างผลึกสูงสุด (RT_p)

ที่ระยะเวลาเก็บรักษา 7 วัน ในกลุ่มของแป้งพบว่า มีอุณหภูมิที่เกิดการสลายโครงร่างผลึกเจด KHF, HTF และ NWF เท่ากับ 58.74, 59.13 และ 59.58 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับกลุ่มของสตาร์ชเช่นเดียวกันกับอุณหภูมิเริ่มต้นเกิดการสลายโครงร่างผลึก โดยเจด KHS, HTS และ NWS มีอุณหภูมิที่เกิดการสลายโครงร่างผลึกสูงสุด (RT_p) เท่ากับ 58.21, 58.54 และ 59.60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งการเก็บรักษาเป็นเวลา 21 วัน มี RT_p ใกล้เคียงกับการเก็บที่ 7 วัน เช่นเดียวกัน โดยเจด HTF, KHF และ NWF มี RT_p เท่ากับ 57.80, 58.23 และ 58.90 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่ เจด HTS, NWS และ KHS มีค่า RT_p เท่ากับ 57.13, 57.16 และ 59.11 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

3) อุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดการสลายโครงร่างผลึก (RT_c)

จากตารางที่ 16 พบว่า เมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มขึ้นจาก 7 วัน เป็น 21 วัน แต่ละตัวอย่างมีค่าอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดการสลายโครงร่างผลึก (RT_c) เพิ่มขึ้น โดยพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 7 วัน เจด NWF, HTF และ KHF มี RT_c เท่ากับ 69.11, 72.87 และ 76.23 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่เจด KHS, HTS และ NWS มีค่า RT_c เท่ากับ 69.70, 73.33 และ 75.78 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สำหรับการเก็บรักษา 21 วัน HTF, KHF และ NWF มี RT_c เท่ากับ 72.59, 74.83 และ 76.66 องศาเซลเซียส ส่วนเจด HTS, KHS และ NWS มี RT_c เท่ากับ 73.40, 75.83 และ 76.51 องศาเซลเซียสตามลำดับ

4) เอนทัลปีของการเกิดรีโทรเกรดชัน (ΔH_{RET})

ค่าพลังงานรวมที่ใช้ในการสลายโครงสร้างผลึกของตัวอย่างหรือเอนทัลปี (ΔH_{RET}) จากการเกิดรีโทรเกรดชันของตัวอย่าง ที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 7 และ 21 วัน แสดงดังตารางที่ 17 ความสามารถในการเกิดรีโทรเกรดชันของแป้ง และสตาร์ช อาจพิจารณาจากค่าพลังงานของการสลายโครงสร้างผลึกได้โดยคำนวณเป็นร้อยละของการเกิดรีโทรเกรดชัน ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นร้อยละของอัตราส่วนของค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานของเจลตัวอย่างที่เกิดรีโทรเกรดชันกับค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานของตัวอย่างที่เกิดการสลายโครงสร้างผลึกของตัวอย่างเดียวกัน ร้อยละการเกิดรีโทรเกรดชัน แสดงดังตารางที่ 18

จากตารางที่ 17 ที่ระยะเวลาการเก็บ 7 วัน เจล NWF HTF และเจล KHF มีค่าเอนทัลปีแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) (7.88, 6.87, 7.34 จูลต่อน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง ตามลำดับ) ในขณะที่กลุ่มของสตาร์ช พบว่า เจล KHS มีค่าพลังงานมากที่สุด (14.04 จูลต่อน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง ตามลำดับ) และมีค่าแตกต่างทางสถิติ ($p\leq 0.05$) กับ เจล NWS และเจล HTS (9.16 และ 8.93 จูลต่อน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง ตามลำดับ)

ที่ระยะเวลาเก็บรักษาเจลที่ 21 วัน เจลแป้งกล้วยทั้ง 3 พันธุ์มีค่าใกล้เคียงกัน และไม่แตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$) ในขณะที่กลุ่มของสตาร์ช พบว่าเจลของ NWS และ HTS มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 11.37 และ 11.31 จูลต่อกรัมของตัวอย่างแห้ง ($p>0.05$) แต่มีค่าพลังงานน้อยกว่า และมีความแตกต่างทางสถิติ ($p\leq 0.05$) กับเจล KHS ที่มีค่าพลังงานรวมของการสลายพันธะมากที่สุด (16.25 จูลต่อกรัม)

ตารางที่16 อุณหภูมิในการสลายพันธะของแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยสามพันธุ์

		(หน่วย: องศาเซลเซียส)			
ตัวอย่าง		$RT_o^{1/, 2/, NS}$		$RT_p^{1/, 2/, NS}$	
		7 วัน	21 วัน	7 วัน	21 วัน
NWF		45.05 ± 0.466 NS	44.56 ± 1.276 NS	59.58 ± 3.584 NS	58.90 ± 0.000 AB
HTF		45.35 ± 0.407 NS	43.67 ± 0.235 NS	59.13 ± 0.639 NS	57.80 ± 0.359 A
KHF		44.46 ± 0.798 NS	44.59 ± 1.907 NS	58.74 ± 1.197 NS	58.23 ± 0.237 AB
NWS		44.74 ± 0.080 NS	44.37 ± 0.680 NS	59.06 ± 0.217 NS	57.16 ± 0.080 A
HTS		44.67 ± 0.197 NS	44.13 ± 3.073 NS	58.54 ± 3.318 NS	57.13 ± 0.356 A
KHS		44.57 ± 0.134 NS	46.20 ± 0.694 NS	58.21 ± 0.451 NS	59.11 ± 0.380 B

หมายเหตุ

1/ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ

2/ ตัวเลขหลังเครื่องหมาย ± คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

NS ตัวอย่างมีค่าแตกต่างกัน อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05)

ตารางที่ 17 ค่าพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะของแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยสามพันธุ์

ตัวอย่าง ^{1/}	เอนทัลปี (ΔH_{RET}) (จุลต่อน้ำหนักแห้ง) ^{2/, 3/}	
	ระยะการเก็บ	
	7 วัน	21 วัน
NWF	7.88 ± 0.073 ab	8.53 ± 0.066 a
HTF	6.87 ± 0.092 a	8.78 ± 0.109 a
KHF	7.34 ± 0.270 a	8.61 ± 0.235 a
NWS	9.16 ± 0.033c	11.37 ± 0.139 b
HTS	8.93 ± 0.695c	11.23 ± 0.037 b
KHS	14.04 ± 0.925 d	16.25 ± 1.154 c

หมายเหตุ ^{1/} ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ โดยตัวอักษรที่ต่างกันในแนวดิ่ง มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{2/} ตัวเลขหลังเครื่องหมาย ± คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

การเกิดรีโทรเกรเดชัน เป็นกระบวนการที่โมเลกุลของสตาร์ชมาจัดเรียงตัวกันใหม่ (กล้านรงค์ และเกื้อกูล, 2546) ดังนั้น ค่าพลังงานที่ได้เป็นพลังงานที่ได้จากการสลายโครงสร้างผลึก โดยสัดส่วนของปริมาณแอมิโลส และแอมิโลเพกทินน่าจะมีผลต่อผลรวมของค่าพลังงาน และการเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลแอมิโลส น่าจะเกิดได้ง่ายกว่า เนื่องจากมีโครงสร้างที่มีความเป็นเส้นตรงมากกว่า ดังนั้น ตัวอย่างที่มีปริมาณแอมิโลสสูง น่าจะเกิดรีโทรเกรเดชันได้เร็วกว่า และมีผลรวมของค่าพลังงานมากกว่า แต่จากผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเจลจากสตาร์ชกล้วยที่การเก็บรักษาเป็นเวลา 7 วัน ไม่ได้เป็นไปตามที่ตั้งสมมติฐานไว้ กล่าวคือ เมื่อพิจารณาที่ตัวอย่างเจล KHS ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำกว่า NWS (ร้อยละ 20.32 และ 28.03 ตามลำดับ) กลับมีค่าพลังงานรวมในการสลายโครงสร้างผลึกมากที่สุด (14.04 จุลต่อน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง) ทั้งนี้ น่าจะมีสาเหตุมาจากโมเลกุลของแอมิโลสของ KHS มีลักษณะเป็นสายตรง และยังมีลักษณะเป็นสายสั้น ๆ ดังนั้นโมเลกุลจึงสามารถกลับมารวมกันใหม่ได้เร็วกว่าโมเลกุลแอมิโลสของ NWS ที่น่าจะมีลักษณะโมเลกุลเป็นสายยาว นอกจากสัดส่วนของปริมาณแอมิโลส และแอมิโลเพกทินแล้ว ความแข็งแรงของพันธะระหว่างโมเลกุลที่มาจัดเรียงตัวกันใหม่ของเจล KHS อาจมีความแข็งแรงกว่าพันธะที่ยึดเหนี่ยวในโมเลกุลของเจล NWS (Hoover and Senayake, 1996)

ข) ผลของความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมี

จากตารางที่ 16 พบว่าเจลของแป้ง และสตาร์ชจากกล้วย มีช่วงอุณหภูมิของการเกิดการสลายโครงสร้างผลึก (RT_o - RT_p - RT_c) ทั้งที่ระยะการเก็บที่ 7 และ 21 วัน ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) โดยจะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 44-77 องศาเซลเซียส แสดงว่าองค์ประกอบทางเคมี เช่น สตาร์ช (สัดส่วนของแอมิโลส และแอมิโลเพกทิน) ไขมัน โปรตีน มีผลต่อช่วงอุณหภูมิของการสลายโครงสร้างผลึกของตัวอย่างที่เกิดรีโทรเกรเดชันน้อยมาก เมื่อพิจารณาค่าพลังงานรวมที่ใช้ในการสลายโครงสร้างผลึกที่ระยะการเก็บรักษาที่ 7 วัน พบว่าเจลของตัวอย่าง HTF มีค่าพลังงานรวมที่ต่ำที่สุด (6.87 จูลต่อน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง) เช่นเดียวกับกับพลังงานรวมที่ใช้ในการสลายโครงสร้างผลึกของตัวอย่างในกลุ่มสตาร์ช พบว่าเจล HTS, NWS มีค่าพลังงานรวมต่ำกว่า (8.93 และ 9.16 จูลต่อน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง) เจลของ KHS (14.04 จูลต่อน้ำหนักของตัวอย่างแห้ง) ($p\leq 0.05$) ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากกล้วยสายพันธุ์หอมทอง (HT) มีปริมาณแอมิโลสน้อยที่สุด และมีปริมาณของไขมันมากที่สุด (ร้อยละ 13.36 และ 4.88 ตามลำดับ) โดยไขมันสามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของแอมิโลสเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขึ้นได้ โดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมัน (amylose-lipid complex : LAM) และมีส่วนยับยั้งการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลแอมิโลสในสตาร์ชได้ด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Singh *et al.* (2003) พบว่าการดไขมันอิสระในสตาร์ชข้าวทำให้เกิดรีโทรเกรเดชันได้ลดลง เนื่องจากกรดไขมันอิสระดังกล่าวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมัน และไปขัดขวางการเรียงโมเลกุลใหม่ของสายแอมิโลเพกทิน ทำให้มีการใช้พลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกต่ำ แสดงว่าเกิดรีโทรเกรเดชันต่ำด้วยนั่นเอง เช่นเดียวกับ Gudmundsson (1994) พบว่า LAM จะไปขัดขวางการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช เมื่อพิจารณาค่าพลังงานที่ระยะการเก็บรักษา 21 วัน พบว่า ในกลุ่มของแป้งมีค่าใกล้เคียงกัน โดย NWF, KHF และ HTF มีค่าพลังงานรวมเท่ากับ 8.53, 8.61 และ 8.78 จูลต่อน้ำหนักตัวอย่างแห้ง ตามลำดับ และพบว่า มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p\leq 0.05$) กับในกลุ่มของสตาร์ช โดยเจลของ KHS มีค่าพลังงานการสลายพันธะสูงที่สุด (16.25 จูลต่อน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง) ซึ่งน่าจะเป็นเพราะโมเลกุลที่มาจัดเรียงตัวกันใหม่ มีความแข็งแรงของพันธะมากกว่าตัวอย่างสตาร์ชชนิดอื่น

ค) ผลของระยะเวลาการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานการสลาย
โครงสร้างผลึก

จากตารางที่ 17 เมื่อพิจารณาตัวอย่างแต่ละชนิด พบว่า ค่าพลังงานการสลาย
โครงสร้างผลึกที่ระยะการเก็บ 7 วัน ต่ำกว่าที่เก็บรักษาไว้ 21 วัน มีค่าพลังงานการสลายพันธะของ
ตัวอย่างแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยทั้ง 3 สายพันธุ์ มีค่าแตกต่างกัน เมื่อเวลาการเก็บรักษามากขึ้น อาจ
สันนิษฐานได้ว่า น่าจะเกิดจาก ความแตกต่างของปริมาณของเอมิโลส, เอมิโลเพกทิน ความแตกต่าง
ของโครงสร้างโมเลกุลของเอมิโลสและเอมิโลเพกทินของตัวอย่าง รวมถึงการเกิดผลึกเอมิโลส และ
การเกิดโครงสร้างผลึกเอมิโลเพกทินของเจลดสตาร์ชในรูปแบบที่มีความแตกต่างกัน (Yaun *et al.*, 1993;
Liu and Thompson, 1998; Vandeputte *et al.*, 2003a)

3.2.3 การเปลี่ยนแปลงของร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชัน

ก) ผลของความแตกต่างของสายพันธุ์ต่อร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชัน

จากตารางที่ 18 ที่ระยะการเก็บรักษา 7 วัน พบว่าตัวอย่างเจลด HTF มีร้อยละ
การเกิดรีโทรเกรเดชันน้อยที่สุด (ร้อยละ 43.14) เจลด KHF เกิดรีโทรเกรเดชัน ร้อยละ 48.42 ส่วนเจลด
NWF มีค่าร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันมากที่สุด คือ ร้อยละ 50.72 ในกลุ่มของสตาร์ชพบว่าเจลด NWS
มีค่าร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันใกล้เคียงกับ (ร้อยละ 46.70) เจลด HTS (ร้อยละ 47.41) ส่วนเจลด KHS มี
ค่าร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันมากที่สุด (ร้อยละ 75.60)

ที่ระยะเวลาการเก็บ 21 วัน พบว่า ในกลุ่มของแป้ง พบว่าเจลด HTF มีค่าร้อยละ
การเกิดรีโทรเกรเดชันต่ำกว่า (ร้อยละ 55.17) เจลด NWF (ร้อยละ 54.93) และเจลด KHF (ร้อยละ 56.83)
ในขณะที่กลุ่มสตาร์ช พบว่า NWS มีค่าต่ำกว่า (ร้อยละ 57.98) HTS (ร้อยละ 59.64) ส่วน KHS มีค่าร้อยละ
การเกิดรีโทรเกรเดชันมากที่สุด คือ ร้อยละ 87.49 (ตารางที่ 18)

เมื่อเปรียบเทียบร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลดในกลุ่มแป้ง และเจลด

ในกลุ่มสตาร์ชในสายพันธุ์เดียวกันในระยะเวลาการเก็บรักษาเดียวกัน พบว่า เจล KHS และ HTS มีการเกิดรีโทรเกรเดชันเพิ่มขึ้น ในขณะที่เจล NWS มีค่าร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันลดลง

ข) ผลของระยะเวลาการเก็บรักษาต่อร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชัน

เมื่อเปรียบเทียบร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันของตัวอย่างในแต่ละสายพันธุ์ที่ระยะเวลาเก็บ 7 และ 21 วัน (ตารางที่ 18) พบว่าทุกตัวอย่าง จะแสดงแนวโน้มเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างมากขึ้น ตัวอย่างเกิดรีโทรเกรเดชันเพิ่มมากขึ้น โดยระยะเวลาการเก็บมีผลต่อร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันของตัวอย่าง ในลักษณะเดียวกันกับที่มีผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานรวมในการสลายพันธะของตัวอย่างที่เกิดรีโทรเกรเดชัน

ตารางที่ 18 ค่าร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งและสตาร์ชจากกล้วย 3 พันธุ์ ที่เก็บรักษาเป็นเวลา 7 และ 21 วัน

ตัวอย่าง ^{1/}	ร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชัน ^{2/}	
	ระยะเวลาเก็บ	
	7 วัน	21 วัน
NWF	50.72	54.93
HTF	43.14	55.17
KHF	48.42	56.83
NWS	46.70	57.98
HTS	47.41	59.64
KHS	75.60	87.49

จากตารางที่ 18 ความแตกต่าง และการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันของตัวอย่าง เมื่อเวลาการเก็บรักษามากขึ้น น่าจะมีสาเหตุเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงของค่าพลังงานการสลายพันธะ คือ สัดส่วนของปริมาณแอมิโลส และแอมิโลเพกทินที่มีความแตกต่างกันในตัวอย่างแต่ละสายพันธุ์ ลักษณะโครงสร้างของแอมิโลส และแอมิโลเพกทิน ดังนั้นการเกิดรีโทรเกรเดชัน ในตัวอย่างที่มีปริมาณแอมิโลสสูง น่าจะมีร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันสูงด้วย แต่จากผลการตรวจสอบ พบว่าไม่ได้เป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ โดยพบว่า เจล NWS ที่มีปริมาณแอมิโลสสูงสุด

(ร้อยละ 28.03) กลับมีค่าร้อยละการเกิดริ้วรอยเรขาคณิตต่ำกว่า (ร้อยละ 46.70) เฉลของ KHS (ร้อยละ 75.60) ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจาก ความเหมาะสมของ โครงสร้างของโมเลกุลเอมิโลส ของเจล NWS ที่ อาจจะมีโมเลกุลเป็นสายยาว ทำให้การจัดเรียงโมเลกุลใหม่เกิดขึ้น ได้ยากกว่าเจลของ KHS ที่น่าจะมี ลักษณะโมเลกุลของเอมิโลสเป็นสายสั้นกว่า (Hoover and Senanayake, 1996) ค่าพลังงานการสลาย พันธะของตัวอย่าง มีความสัมพันธ์กับร้อยละการเกิดริ้วรอยเรขาคณิต คือ เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษามาก ขึ้น ทำให้การเกิดริ้วรอยเรขาคณิตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าพลังงานการสลายพันธะเพิ่มขึ้นด้วย

3.3 สมบัติด้านความหนืดความหนืด

การตรวจสอบความหนืดของตัวอย่างแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยดิบ 3 พันธุ์ ด้วยเครื่อง วิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว (RVA) ซึ่งแสดงผลเป็นกราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืด ค่าที่ได้จาก กราฟ เป็นค่าความหนืดของตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่ทำการตรวจสอบอยู่ในสภาวะของสารละลายที่มีความ เข้มข้นที่กำหนด (ร้อยละ 7-12) จากนั้นจึงมีการเพิ่มและลดอุณหภูมิตามเวลาที่กำหนด และมีการกวน ตลอดเวลาของการตรวจสอบ ตัวอย่างกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าที่ ความเข้มข้นร้อยละ 10แสดงดังภาพที่ 26 ส่วนกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนืดของตัวอย่างอื่น ๆ แสดงในภาคผนวก ง)

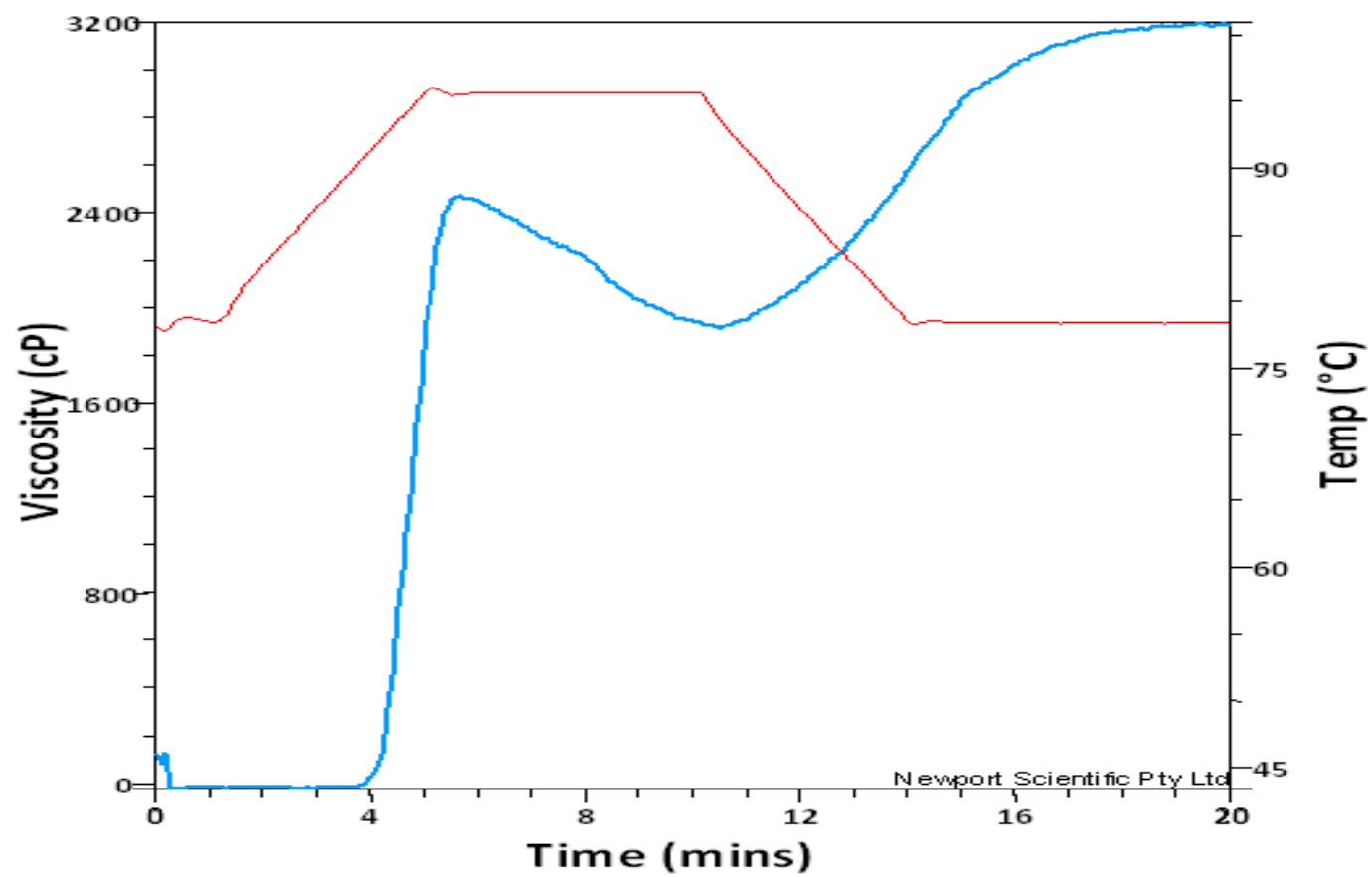
กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของตัวอย่างแป้ง และสตาร์ช จากกล้วยทั้งสามชนิด ปรากฏในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน เริ่มต้นจาก เมื่อตัวอย่างอยู่ในสภาวะสารละลาย กำหนดให้มีการกวน เป็นเวลา 1 นาที โดยยังไม่มีกรให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง จะไม่พบการปรากฏของค่าความหนืด เนื่องจาก เป็นช่วงที่เมล็ดสตาร์ชเริ่มมีการดูดซึมน้ำเข้าไปภายในโมเลกุล (Collado and Corke, 2003) โมเลกุลของน้ำเกิดอันตรกิริยาดัวยพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลเอมิโลส และ เอมิโลเพกทิน ซึ่งจะทำให้เมล็ดสตาร์ชเริ่มเกิดการพองตัว (Tester, 1997) แต่โดยปกติแล้วสตาร์ชไม่ สามารถละลายได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลในเซชัน ทำให้มีการดูดซึมน้ำได้อย่างจำกัด และมีการพองตัวแบบผันกลับได้ (กล้านรงค์ และเกื้อกุล, 2546) สอดคล้องกับผลการทดลองในส่วน ของการพองตัวและการละลาย โดยช่วงอุณหภูมิ 55-75 องศาเซลเซียส แป้งและสตาร์ชจากกล้วยทั้ง 3 พันธุ์ มีค่าการละลาย และการพองตัวต่ำ ดังนั้นจึงไม่เกิดความหนืดขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ ตัวอย่าง จาก 50 องศาเซลเซียส จนถึง 95 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลาประมาณ 4 นาที จึงเริ่มปรากฏกราฟ การเปลี่ยนแปลงความหนืด และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ในส่วนนี้เป็นการ เปลี่ยนแปลงที่เกิดจาก เม็ดสตาร์ชสามารถดูดน้ำได้มากขึ้น มีการพองตัวเพิ่มขึ้นอีกหลายเท่าตัว (Singh

et al, 2003) อีกทั้งยังเกิดการเสียดสีกับเม็ดสตาร์ชข้างเคียง เนื่องจากแรงกวนของใบพัด ทำให้ความหนืดของเพส (paste) เพิ่มขึ้น (Lund, 1984) จนกระทั่งถึงจุดความหนืดวิกฤติ ซึ่งเม็ดสตาร์ชจะเกิดการพองตัวแบบไม่สามารถผันกลับได้ และเริ่มเกิดความหนืดขึ้นอย่างรวดเร็ว (Phillips and Williams, 2000) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืด เรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลิตีในเซชัน ซึ่งจะได้อ่านค่าที่ตรวจวัดจากกราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืด คือ อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting time) (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2546) โดยความหนืดที่เพิ่มขึ้นของระบบเป็นผลเนื่องมาจาก โมเลกุลของเอมิโลสที่แพร่ออกมาจากเม็ดสตาร์ช (Tester, 1997) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 95 องศาเซลเซียส เม็ดแป้งมีการพองตัวอย่างเต็มที่มากที่สุด ทำให้ตัวอย่างมีความหนืดสูงสุด เกิดเป็นกราฟความหนืดสูงสุดขึ้น (peak viscosity) ซึ่งในส่วนนี้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ชจะมีความอ่อนแอมาก (Greenwood, 1979) ในขณะที่ใบพัดยังกวนต่อไปและมีการคงอุณหภูมิไว้ที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ทำให้ในที่สุดเม็ดสตาร์ชเกิดการแตกออก มีผลให้โมเลกุลของสตาร์ชออกมาในระบบมากขึ้น เม็ดสตาร์ชเกิดการสูญเสียโครงสร้างไป เม็ดสตาร์ชเกิดการเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันกับการกวน ทำให้เกิดความหนืดลดลง (breakdown) (Takahashi and Seib, 1988) เมื่อลดอุณหภูมิลงจาก 95 องศาเซลเซียส จนถึง 50 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลา 4 นาที มีผลทำให้โมเลกุลของสตาร์ชที่อยู่ใกล้กัน เกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติโครงสร้างใหม่ที่สามารถอุ้มน้ำ และไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2545) ส่งผลให้ความหนืดของตัวอย่างเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง การเปลี่ยนแปลงความหนืดในขั้นนี้ เป็นผลมาจาก การที่โมเลกุลของสตาร์ชที่เป็นสายตรงสามารถเคลื่อนที่ และจัดเรียงตัวกันใหม่ ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) (Smith, 1979) ทำให้ได้ค่าการคืนตัว (setback) เมื่อลดอุณหภูมิลงจนถึง 50 องศาเซลเซียส และคงไว้จนสิ้นสุดการตรวจสอบ (6 นาที) ซึ่งจะได้ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity)

พารามิเตอร์ที่จะได้จากกราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง และสตาร์ชที่ตรวจสอบได้แก่ อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (เวลาที่เริ่มเกิดความหนืด) ความหนืดสูงสุด ความหนืดลดลง การคืนตัวหรือเซตแบค และความหนืดสุดท้าย การที่ตัวอย่างมีความเข้มข้นแตกต่างกัน จะส่งผลให้ค่าการความหนืดมีความแตกต่างด้วย

รูปแบบของกราฟความหนืดที่ได้จากการตรวจสอบตัวอย่างแป้งและสตาร์ชจากกล้วยทั้ง 3 พันธุ์ ที่ความเข้มข้นของตัวอย่างเท่ากับร้อยละ 7, 8, 9, 10 และ 12 พบว่ามีลักษณะการเพิ่มขึ้น และลดลงที่คล้ายคลึงกัน โดยเมื่อความเข้มข้นของตัวอย่างมากขึ้น ค่าความหนืดมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น

ด้วย ค่าพารามิเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงความหนักของตัวอย่างเป็ง และสตา์ชจากกล้วย ที่มีความ
เข้มข้นดังกล่าว แสดงดังตารางที่ 19-23 โดยงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาผลของความเข้มข้น ต่อการ
เปลี่ยนแปลงค่าความหนักในแต่ละตัวอย่าง



ภาพที่ 30 แผนภูมิการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว ที่ความเข้มข้นของตัวอย่างร้อยละ 10 ของ NWF

3.3.1 อุณหภูมิเริ่มต้นเกิดความหนืด (pasting temperature)

จากตารางที่ 19 พบว่า ความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น ไม่มีผลต่ออุณหภูมิเริ่มเกิด ความหนืด ของ NWF, HTS และ KHS แต่มีผลต่ออุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดของ HTF, KHF และ NWS โดยอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดมีค่าแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นไม่มี ความสัมพันธ์ใด ๆ กับค่าอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดความหนืด กล่าวคือ เมื่อความเข้มข้นของตัวอย่าง เพิ่มขึ้น อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดของตัวอย่างมีทั้งลดลง และเพิ่มขึ้น ไม่มีแนวโน้มของการ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ชัดเจน เช่น ในตัวอย่าง KHF ที่ความเข้มข้นร้อยละ 7, 8, 9, 10 และ 12 มี อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด เท่ากับ 76.93, 76.90, 78.45, 76.58, 75.43 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างแป้ง และสตาร์ชในสายพันธุ์เดียวกัน พบว่า อุณหภูมิ เริ่มเกิดความหนืดของแป้ง และสตาร์ชมีค่าแตกต่างกัน โดยมีแนวโน้มที่ไม่แน่นอนที่แต่ละความเข้มข้น อาจเนื่องมาจาก แป้ง และสตาร์ชเกิดการละลาย และมีการพองตัวในปริมาณที่แตกต่างกัน เนื่องจาก ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน เช่น ปริมาณของไขมัน หรือ โปรตีน รวมถึงปริมาณของ แอมิโลส และแอมิโลเพกทินที่มีในตัวอย่างแป้ง และสตาร์ชที่มีความแตกต่างกันด้วย เมื่อพิจารณาใน เฉพาะกลุ่มของแป้ง และกลุ่มของสตาร์ช พบว่า ทั้งสองกลุ่มมีแนวโน้มของอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดที่ คล้ายคลึงกัน โดย ตัวอย่างที่มีปริมาณแอมิโลสสูง จะมีอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดความหนืดสูงกว่าตัวอย่าง ที่มีปริมาณแอมิโลสดำกว่า เนื่องจากอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดความหนืด เกี่ยวข้องกับความสามารถใน การละลาย และการพองตัวของเม็ดสตาร์ช สตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลเพกทินต่ำ (แอมิโลสสูง) จะเกิด การละลาย และพองตัวได้น้อยกว่า การเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวได้มากขึ้น ดังนั้น ตัวอย่างที่มีปริมาณแอมิโลสสูง และมีการพองตัวต่ำ จึงมีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดสูงกว่าตัวอย่างที่มี แอมิโลสต่ำ และมีการพองตัวสูงกว่า

ตารางที่ 19 อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดของแป้งและสตราซ์จากกล้วยทั้ง 3 พันธุ์ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

(หน่วย: องศาเซลเซียส)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น (ร้อยละ) ^{1/, 2/, 3/}				
	7	8	9	10	12
NWF	76.20 ± 1.061 nsA	77.30 ± 2.687 nsAB	77.35 ± 0.566 nsBC	78.43 ± 1.025 nsC	77.00 ± 2.263 nsNS
HTF	75.35 ± 0.070 aA	76.20 ± 0.071 bAB	76.23 ± 0.035 bAB	75.73 ± 0.530 abAB	76.18 ± 0.035 bNS
KHF	76.93 ± 1.025 abAB	76.90 ± 0.990 abAB	78.45 ± 1.131 bC	76.58 ± 0.530 abAB	75.43 ± 0.035 aNS
NWS	78.40 ± 0.071 bB	79.16 ± 0.057 bB	77.10 ± 0.849 aABC	77.10 ± 0.141 aBC	76.15 ± 0.071 aNS
HTS	75.43 ± 0.035 nsA	75.42 ± 0.035 nsA	75.40 ± 0.000 nsA	75.43 ± 0.035 nsA	75.38 ± 0.035 nsNS
KHS	75.78 ± 0.601 nsA	75.38 ± 0.035 nsA	76.58 ± 0.601 nsAB	75.78 ± 0.530 nsAB	75.80 ± 0.636 nsNS

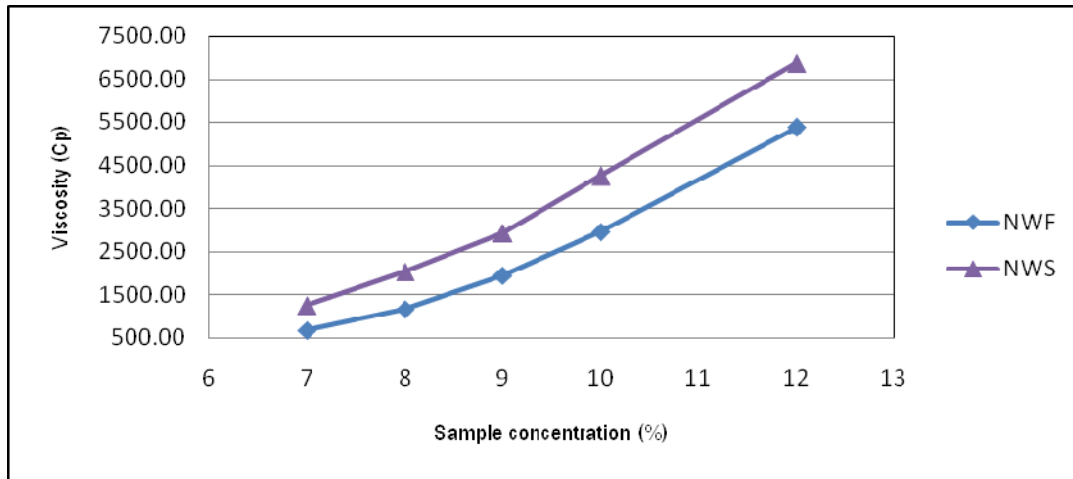
หมายเหตุ ^{1/} ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ และ ± คือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
^{2/} อักษรตัวเล็กแสดงความแตกต่างในแนวนอนที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
^{3/} อักษรตัวใหญ่แสดงความแตกต่างในแนวตั้งที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3.3.2 ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity)

จากตารางที่ 20 เมื่อพิจารณาในแต่ละตัวอย่าง ที่แต่ละระดับความเข้มข้น พบว่าทุกตัวอย่างจะให้ค่าความหนืดสูงสุดเป็นแนวโน้มเดียวกันทั้งในกลุ่มของแป้ง และกลุ่มของสตาร์ช กล่าวคือ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่าความหนืดสูงสุดจะเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ความเข้มข้นร้อยละ 7 ของทุกตัวอย่าง มีค่าความหนืดสูงสุดต่ำที่สุด ส่วนที่ความเข้มข้นร้อยละ 12 ตัวอย่างมีความหนืดสูงสุดมากที่สุด นอกจากนี้ทุกความเข้มข้นของตัวอย่าง มีค่าความหนืดสูงสุดแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ตัวอย่างที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่อความเข้มข้นของตัวอย่าง เพิ่มขึ้นน้อยที่สุด คือ NWF โดยมีค่าความหนืดสูงสุดที่ความเข้มข้นร้อยละ 7, 8, 9, 10 และ 12 อยู่ในช่วง 541-4,764 เซนติพอยส์ ขณะที่ตัวอย่างที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดสูงสุด มากที่สุด คือ KHS โดยมีค่าความหนืดสูงสุดอยู่ในช่วง 1,631.5-8,770 เซนติพอยส์ เมื่อพิจารณาในกลุ่มของแป้ง พบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของตัวอย่าง HTF ที่ความเข้มข้นร้อยละ 7-8 มีค่าความหนืดสูงสุดมากที่สุด (967-1,629.5 เซนติพอยส์) แต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เป็นร้อยละ 9-12 KHF จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดสูงสุดมากที่สุด (2,300-6,900 เซนติพอยส์) ในขณะที่ตัวอย่าง NWF มีการเปลี่ยนแปลงความหนืดสูงสุดน้อยที่สุดในทุกความเข้มข้น (541-4,674 เซนติพอยส์) สำหรับในกลุ่มของสตาร์ช พบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดสูงสุดเมื่อความเข้มข้นของตัวอย่างเพิ่มขึ้น เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ KHS(1,631.5-8,770 เซนติพอยส์), HTS (1,585-8,086.5 เซนติพอยส์) และ NWS (1,247-6,862 เซนติพอยส์) เมื่อพิจารณาตัวอย่างแป้ง และสตาร์ชในสายพันธุ์เดียวกัน พบว่าทุกสายพันธุ์ จะมีค่าความหนืดสูงสุดของสตาร์ชสูงกว่าความหนืดสูงสุดของแป้ง ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับค่าความหนืดสูงสุด ของแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยน้ำว้า แสดงดังภาพที่ 31

จากตารางที่ 20 ความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดสูงสุด ของตัวอย่างแป้งและสตาร์ชเป็นผลมาจาก ปริมาณของสตาร์ชที่มีในแต่ละตัวอย่าง ที่แต่ละความเข้มข้นไม่เท่ากัน ส่งผลให้มีการละลาย และการพองตัวที่แตกต่างกัน ซึ่งตัวอย่างที่มีความเข้มข้นมาก จะมีค่าความหนืดสูงสุดมาก แสดงว่า เมื่อตัวอย่างมีปริมาณของสตาร์ชสูง จะทำให้มีความสามารถในการต้านทานแรงกวนได้มากกว่า ตัวอย่างที่มีปริมาณของสตาร์ชต่ำกว่า สำหรับความแตกต่างของค่าความหนืดสูงสุดของตัวอย่างแป้ง และสตาร์ชในสายพันธุ์เดียวกัน นอกจากผลของปริมาณสตาร์ชในตัวอย่างแล้ว ยังอาจเกิดจากองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ด้วย ได้แก่ ปริมาณแอมิโลส ปริมาณไขมัน และปริมาณโปรตีน (Hamaker and Griffin, 1993; Chung *et al.*, 2003) ซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถในการละลาย และการพองตัวของตัวอย่าง เช่น ปริมาณไขมันที่มีในตัวอย่างของแป้ง สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ

โมเลกุลแอมิโลสได้ และสามารถยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ช ทำให้ที่จุดความหนืดวิกฤต เม็ดสตาร์ชในตัวอย่างของแป้ง มีการพองตัวที่จำกัดกว่าในตัวอย่างของสตาร์ชซึ่งสอดคล้องกับ Chung *et al.*, (2003) ซึ่งพบว่าการสกัดไขมันออกจากสตาร์ชมีผลทำให้ค่าความหนืดสูงสุดเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความเข้มข้นของตัวอย่างกับค่าความหนืดสูงสุด

- หมายเหตุ
1. NWF คือ แป้งกล้วยน้ำว้า และ NWS คือ สตาร์กกล้วยน้ำว้า
 2. ความสัมพันธ์ระหว่างแป้ง และสตาร์ชสายพันธุ์หอมทอง และไข่ แสดงในภาคผนวก ง

ตารางที่ 20 ความหนืดสูงสุดของแป้งและสตาร์ชจากกล้วยทั้ง 3 พันธุ์ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

(หน่วย: เซนติพอยส์)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น (ร้อยละ) ^{1/, 2/,3/}				
	7	8	9	10	12
NWF	541.00 ± 11.314 aA	1,016.50 ± 10.607 bA	1,626.00 ± 1.414 cA	2,414.50 ± 72.832 dA	4,764.00 ± 16.971 eA
HTF	967.00 ± 12.728 aC	1,629.50 ± 6.364 bC	2,470.50 ± 99.702 cB	3,387.00 ± 134.350 dB	6,447.00 ± 101.823 eB
KHF	897.50 ± 2.121 aB	1,398.00 ± 41.012 bB	2,300.00 ± 74.953 cB	3,847.00 ± 186.676 dC	6,900.00 ± 216.375 eC
NWS	1,247.00 ± 2.828 aD	2,035.00 ± 21.213 bD	2,928.50 ± 2.121 cC	4,250.00 ± 45.255 dD	6,862.50 ± 111.016 eBC
HTS	1,585.00 ± 22.627 aE	2,423.00 ± 14.142 bE	3,545.00 ± 11.314 cD	4,857.00 ± 11.314 dE	8,086.50 ± 345.775 eD
KHS	1,631.50 ± 27.577 aF	2,507.00 ± 18.385 bF	3,726.50 ± 123.744 cE	5,190.50 ± 34.648 dF	8,770.00 ± 8.485 eE

หมายเหตุ

^{1/} ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ และ ± คือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

^{2/} อักษรตัวเล็กแสดงความแตกต่างในแนวนอนที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

^{3/} อักษรตัวใหญ่แสดงความแตกต่างในแนวตั้งที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

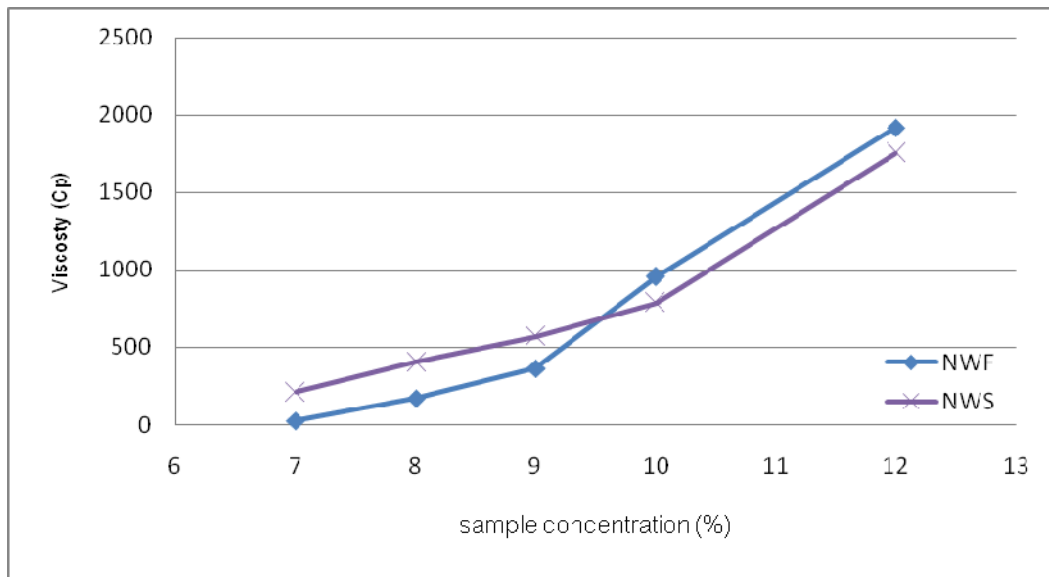
3.3.3 ความหนึ่ดลดลง (breakdown)

จากตารางที่ 21 เมื่อพิจารณาในแต่ละตัวอย่าง พบว่าทุกตัวอย่างมีความหนึ่ดลดลงเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวอย่างเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าความหนึ่ดสูงสุดของตัวอย่าง โดยทุกตัวอย่างที่ความเข้มข้น 7-8 มีค่าความหนึ่ดลดลงไม่แตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$) และความหนึ่ดลดลงของตัวอย่างแบ่งในสายพันธุ์เดียวกัน มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนึ่ดลดลง น้อยกว่าตัวอย่างสตร้าในกล้วยสายพันธุ์เดียวกัน ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวอย่างกับค่าความหนึ่ดลดลง แสดงดังภาพที่ 32

เมื่อพิจารณาในแต่ละกลุ่ม พบว่า NWF มีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนึ่ดลดลง เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นน้อยที่สุด (247.5-1,355 เซนติพอยส์) และ KHF มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนึ่ดลดลงมากที่สุด (251.5-3,480 เซนติพอยส์) ในกลุ่มของสตร้าพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนึ่ดลดลงเป็นแนวโน้มเดียวกันกับค่าความหนึ่ดสูงสุด คือ KHS (301.5-4,660.5 เซนติพอยส์) HTS (254.5-3,856.5 เซนติพอยส์) และ NWS (209-1,761.5 เซนติพอยส์) ตามลำดับ

ค่าความหนึ่ดลดลง เป็นค่าที่ใช้บอกความทนต่อแรงกวนของเมล็ดสตร้าที่มีการพองตัวสูงสุด และเกิดการแตกออก โดยปริมาณแอมิโลสที่แพร่ออกมา จะมีการจัดเรียงตัวในแนวเดียวกับการกวนของใบพัด ตัวอย่างที่มีค่าความหนึ่ดลดลงสูง แสดงว่ามีความต้านทานต่อการกวนได้ต่ำ เมล็ดสตร้ามีความทนต่อแรงกวนได้น้อย ค่าความหนึ่ดลดลงจะขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลภายในเมล็ดสตร้า ที่ทำให้เมล็ดสตร้าที่พองตัว มีความทนต่อแรงกวน (Chung *et al.*, 2003) ดังนั้น โมเลกุลภายในเมล็ดสตร้าที่น่าจะมีผลโดยตรงต่อค่าความหนึ่ดลดลงของตัวอย่าง คือ ปริมาณแอมิโลสที่แพร่ออกมานอกเมล็ดสตร้า และขึ้นอยู่กับความสามารถในการพองตัวของเมล็ดสตร้าชนิดนั้นๆ ด้วย จากผลการวิเคราะห์พบว่า NWS ที่มีปริมาณแอมิโลสสูงที่สุด (ร้อยละ 28.03) มีค่าความหนึ่ดลดลงต่ำที่สุด แสดงว่ามีความต้านทานมาก เนื่องจากเมล็ดสตร้าที่มีปริมาณแอมิโลสสูง มีความแข็งแรงและไม่ถูกทำลายด้วยความร้อนได้ง่าย ในขณะที่ เมล็ดสตร้าที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำกว่า จะมีแนวโน้มถูกทำลายได้ง่ายกว่า ขณะที่มีการพองตัว (Lii *et al.*, 1996) ความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงค่าความหนึ่ดสูงสุดของตัวอย่างแบ่งและสตร้าในสายพันธุ์เดียวกัน น่าจะเป็นผลมาจากองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น โปรตีน ไขมัน ที่มีความแตกต่างกัน โดยตัวอย่างแบ่งจะมีปริมาณไขมัน โปรตีน มากกว่าสตร้า ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้ จะทำให้การพองตัวของเมล็ดสตร้าน้อยลง ส่งผลให้เมล็ดสตร้ายังสามารถคงรูปร่างได้ในปริมาณที่มากกว่า จึงส่งผลให้มีความต้านทานแรงกวนได้

มากกว่าด้วย ซึ่งสอดคล้องกับ Mota *et al.* (2000) พบว่า แป้งกล้วยที่มีปริมาณไขมันสูงกว่า จะมีค่าความหนืดลดลงต่ำกว่า ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหนืดลดลงของตัวอย่าง คือ ปริมาณแอมิโลส ความแข็งแรงของแรงยึดเหนี่ยวของพันธะในโมเลกุลของเม็ดสตาร์ช และ องค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆ



ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวอย่างกับค่าความหนืดลดลง

- หมายเหตุ
1. NWF คือ แป้งกล้วยน้ำว้า และ NWS คือ สตาร์ชกล้วยน้ำว้า
 2. ความสัมพันธ์ระหว่างแป้ง และสตาร์ชสายพันธุ์หอมทอง และไข่ แสดงในภาคผนวก ง

ตารางที่ 21 ความหนืดลดลงของแป้งและสารถีจากกล้วยทั้ง 3 พันธุ์ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

(หน่วย: เซนติพอยส์)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น (ร้อยละ) ^{1/, 2/, 3/}				
	7	8	9	10	12
NWF	247.50 ± 0.707 aB	346.50 ± 19.092 aBC	354.00 ± 36.770 aA	498.50 ± 77.075 bA	1,355.00 ± 65.054 cA
HTF	307.00 ± 0.000 aC	384.00 ± 11.314 aC	377.00 ± 25.456 aAB	612.50 ± 0.707 bAB	2,415.50 ± 62.933 cB
KHF	251.50 ± 9.192 aB	314.50 ± 19.092 aB	506.50 ± 30.406 aAB	1,458.00 ± 131.522 bC	3,480.00 ± 220.617 cC
NWS	209.00 ± 5.657 aA	402.00 ± 42.426 abC	571.00 ± 4.243 bcB	787.00 ± 90.510 cB	1,761.50 ± 212.839 dA
HTS	254.50 ± 4.950 aB	175.50 ± 21.920 aA	487.50 ± 38.891 aAB	1,418.50 ± 33.234 bC	3,856.50 ± 258.094 cC
KHS	301.50 ± 26.163 aC	478.50 ± 10.607 aD	966.50 ± 171.827 bC	1,848.50 ± 65.761 cD	4,660.50 ± 3.536 dD

หมายเหตุ ^{1/} ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ และ ± คือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
^{2/} อักษรตัวเล็กแสดงความแตกต่างในแนวนอนที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
^{3/} อักษรตัวใหญ่แสดงความแตกต่างในแนวตั้งที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3.3.4 ความหนืดสุดท้าย (final viscosity)

จากตารางที่ 22 เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนืดสุดท้ายที่เปลี่ยนแปลงในทุกตัวอย่าง พบว่า ความเข้มข้นของตัวอย่างเพิ่มขึ้น ความหนืดสุดท้ายจะเพิ่มขึ้นด้วย โดยค่าความหนืดสุดท้ายของตัวอย่างในทุกความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น มีค่ากันแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยตัวอย่างในกลุ่มของแป้งมีค่าความหนืดสุดท้ายต่ำกว่ากลุ่มของสตาร์ช เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละกลุ่มตัวอย่าง พบว่า ที่ความเข้มข้นร้อยละ 7-10 HTF จะมีค่าความหนืดสุดท้ายที่แต่ละความเข้มข้นมากที่สุด (1,250-4,128 เซนติพอยส์) ส่วน NWF จะมีค่าความหนืดสุดท้ายต่ำที่สุด (688.5-3,143 เซนติพอยส์) ในขณะที่ความเข้มข้นร้อยละ 12 NWF มีค่าความหนืดสุดท้ายสูงที่สุด 6,203.5 เซนติพอยส์ ส่วน KHF มีค่าความหนืดสุดท้ายต่ำที่สุด (4,857.5 เซนติพอยส์) เมื่อพิจารณาในกลุ่มของสตาร์ช พบว่า ที่ความเข้มข้นร้อยละ 7, 8 NWS มีค่าความหนืดสุดท้ายน้อยกว่าสตาร์ชชนิดอื่น ๆ (1,596.5-3,134.5 เซนติพอยส์) แต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มเป็นร้อยละ 9-12 พบว่า ค่าความหนืดสุดท้ายของ NWS มีค่าสูงกว่า (5,007.5-5,987 เซนติพอยส์) HTS (3,951.5-4,564 เซนติพอยส์) และ KHS (4,229.5-4,519.5 เซนติพอยส์)

ความหนืดสุดท้ายเกิดขึ้นจากการเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลแอมิโลสที่แพร่ออกมาจากเม็ดสตาร์ช (กล้านรงค์ และเกื้อกูล, 2546) แต่จากผลการตรวจสอบ พบว่า ในกลุ่มของแป้ง ความหนืดสุดท้ายของ HTF ที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำที่สุด กลับมีค่าความหนืดสุดท้ายสูงสุดที่ความเข้มข้นร้อยละ 7-10 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก การที่ HTF มีปริมาณของโปรตีน และไขมันที่มีมากที่สุด (ร้อยละ 4.47 และ 4.88 ตามลำดับ) โดยโปรตีน และไขมันดังกล่าวอาจไปขัดขวางการพองตัว และการเกิดกระบวนการเจลลิตีในเซชันของตัวอย่าง ซึ่งโปรตีนสามารถสร้างพันธะไดซัลไฟด์กับโมเลกุลของสตาร์ชทำให้เม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้น (Hamaker and Griffin, 1993) ส่วนไขมันจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลของแอมิโลสยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ช ดังนั้น จึงทำให้เม็ดสตาร์ชที่มีโครงสร้างแข็งแรงเหลืออยู่ หลังจากที่มีการลดอุณหภูมิลง และคงอุณหภูมิไว้ที่ 50 องศาเซลเซียสจึงปรากฏผลค่าความหนืดสุดท้ายมีค่ามากกว่า NWF และ KHF ที่มีปริมาณของโปรตีน (ร้อยละ 1.88 และ 4.37 ตามลำดับ) และไขมันต่ำกว่า (ร้อยละ 2.15 และ 1.56 ตามลำดับ) ซึ่งคล้ายคลึงกับผลงานวิจัยของ Mota *et al.* (2000) ที่พบว่า อาจเป็นเพราะแป้งสามารถเกิดอันตรกิริยากับองค์ประกอบชนิดอื่น เช่น เส้นใย (soluble fiber) และส่งผลต่อความสามารถในการพองตัวของตัวอย่าง โดย Hoover (1998) กล่าวว่า การที่มีไขมันในระบบ จะยับยั้งการเกิดรีโทรเกรดของสตาร์ช อาจเป็นเพราะเกิดการรวมตัวกันโดยอันตรกิริยาของ องค์ประกอบของสตาร์ช (แอมิโลส หรือ แอมิโลเพกทิน) กับโมเลกุลของไขมัน และขัดขวางการจัดเรียงตัวใหม่ขององค์ประกอบของสตาร์ช

Hamaker and Griffin (1990) พบว่าการจัดพันธะไดซัลไฟล์ออกจากโมเลกุลของสตาร์ชข้าว ทำให้ความหนืดสุดท้ายมีค่าลดลง เช่นเดียวกับ Takahashi and Seib (1988) ที่พบว่า การมีไขมันในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ความหนืดสุดท้ายเพิ่มขึ้น แต่สำหรับในกลุ่มของสตาร์ชที่มีความเข้มข้นร้อยละ 7-8 ที่พบว่าตัวอย่าง NWS ซึ่งมีปริมาณแอมิโลสสูงสุด น่าจะมีค่าความหนืดสุดท้ายสูงสุดด้วย (ตารางที่ 8) แต่กลับมีค่าความหนืดสุดท้ายน้อยกว่า (1,596-3,134 เซนติพอยส์) HTS และ KHS ที่มีปริมาณแอมิโลสน้อยกว่า (2,589-3,448 เซนติพอยส์ และ 2,449-3,640 เซนติพอยส์ ตามลำดับ) ซึ่งอาจสันนิษฐานได้ว่า ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลแอมิโลสของ NWS เกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ได้ยากกว่า เนื่องจากโครงสร้างน่าจะมีลักษณะเป็นสายยาว ในขณะที่ KHS โมเลกุลแอมิโลสมีขนาดสายสั้นกว่า ทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้สะดวกและจัดเรียงตัวกันใหม่ได้มากกว่า ส่งผลให้เกิดรีโทรเกรเดชัน และมีความหนืดสุดท้ายสูงกว่า NWS แต่เมื่อความเข้มข้นของสตาร์ชเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณแอมิโลสในตัวอย่าง NWS เพิ่มมากขึ้นด้วย จึงเกิดรีโทรเกรเดชัน และมีความหนืดสุดท้ายสูงที่สุดด้วย อีกทั้งการที่โมเลกุลของแอมิโลสที่มีสายยาวอยู่ชิดกันมากขึ้น จึงเกิดการสร้างพันธะใหม่ได้ง่ายขึ้น เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ได้ง่ายกว่า จึงเกิดรีโทรเกรด และมีความหนืดสุดท้ายสูงกว่าตัวอย่างอื่น ๆ

ตารางที่ 22 ความหนืดสุดท้ายของแป้งและสสารจากกล้วยทั้ง 3 พันธุ์ ที่ร้อยละความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่างแต่ละชนิด

(หน่วย: เซนติพอยส์)

ตัวอย่าง	(ความเข้มข้น) ร้อยละ ^{1/, 2/, 3/}				
	7	8	9	10	12
NWF	688.50 ± 0.707 aA	1,209.00 ± 4.243 bA	2,004.50 ± 14.849 cA	3,143.00 ± 55.154d A	6,203.50 ± 10.607 eD
HTF	1,250.00 ± 0.00 aC	2,137.50 ± 9.192 bC	3,242.50 ± 102.530 cC	4,128.00 ± 147.078 dC	5,552.00 ± 80.610 eC
KHF	989.50 ± 13.435 aB	1,594.50 ± 75.660 bB	2,512.00 ± 103.238 cB	3,368.50 ± 85.560 dB	4,857.50 ± 31.820 eB
NWS	1,596.50 ± 17.678 aD	3,134.50 ± 70.004 bD	5,007.50 ± 4.950 cF	6,506.00 ± 12.728 eF	5,987.00 ± 89.095 dD
HTS	2,589.00 ± 25.456 aF	3,448.00 ± 29.698 bE	3,951.50 ± 2.121 cD	4,333.50 ± 9.192 dD	4,564.00 ± 29.698 eA
KHS	2,449.00 ± 26.870 aE	3,640.00 ± 1.414 bF	4,229.50 ± 190.212 cE	4,540.50 ± 10.607 cE	4,519.50 ± 217.082 cA

หมายเหตุ

^{1/}

ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ และ ± คือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

^{2/}

อักษรตัวเล็กแสดงความแตกต่างในแนวนอนที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

^{3/}

อักษรตัวใหญ่แสดงความแตกต่างในแนวตั้งที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3.3.5 เขตแบบค

จากตารางที่ 23 พบว่าในกลุ่มของตัวอย่างแบ่งกล้วย เมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น ค่าเขตแบบคของตัวอย่างเพิ่มมากขึ้น โดย NWF มีการเปลี่ยนแปลงของค่าเขตแบบคที่ความเข้มข้นต่าง ๆ มากที่สุด (395-2,794.5 เซนติพอยส์) ในขณะที่ HTF และ KHF มีการเปลี่ยนแปลงของเขตแบบคใกล้เคียงกัน (590.00-1,520.5 และ 343-1,437.5 เซนติพอยส์ ตามลำดับ) เมื่อพิจารณาในกลุ่มสตาร์ช พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสตาร์ชเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 7 จนถึง ร้อยละ 10 NWS และ HTS มีค่าเขตแบบคเพิ่มสูงขึ้น แต่จะลดลง เมื่อความเข้มข้นเป็นร้อยละ 12 ซึ่งที่ความเข้มข้น 7-8 NWS จะมีค่าเขตแบบคต่ำกว่า (558.5-1,501.5 เซนติพอยส์) HTS และ KHS (1,258.5-1,200.5 และ 1,119-1,611.5 เซนติพอยส์ ตามลำดับ) แต่ที่ความเข้มข้นร้อยละ 9-10 NWS มีค่าเขตแบบคสูงกว่า (2,650-3,043 เซนติพอยส์) HTS (894- 895 เซนติพอยส์) KHS (1,469.5-1,198.5 เซนติพอยส์) ตามลำดับ สำหรับที่ความเข้มข้นร้อยละ 12 ของสตาร์ช พบว่าค่าเขตแบบคของตัวอย่าง NWS มีค่ามากที่สุด (886 เซนติพอยส์) รองลงมาคือ KHS (410 เซนติพอยส์) HTS (334 เซนติพอยส์) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มของแป้ง กับกลุ่มของสตาร์ชพบว่าตัวอย่างสตาร์ชมีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของค่าเขตแบบคที่น้อยกว่า ตัวอย่างของแป้งกล้วยในสายพันธุ์เดียวกัน

ค่าเขตแบบคหรือค่าการคืนตัวของสตาร์ช เป็นค่าที่แสดงแนวโน้มของการเกิดรีโทรเกรดเดชันของตัวอย่างได้ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าเขตแบบคในกลุ่มของแป้ง น่าจะเป็นผลมาจากปริมาณแอมิโลส โดยตัวอย่างที่มีแอมิโลสสูง จะมีแนวโน้มในการเกิดค่าเขตแบบคสูงทั้งนี้ อาจเนื่องมาจาก การที่มีปริมาณแอมิโลสสูง ทำให้มีปริมาณของแอมิโลสที่แพร่ออกมานอกเมล็ดสตาร์ชได้สูงกว่าสตาร์ชที่มีแอมิโลสต่ำ ทำให้การจัดเรียงตัวใหม่ที่เกิดจากโมเลกุลของแอมิโลสของตัวอย่าง NWF ซึ่งมีปริมาณแอมิโลสสูงที่สุด เกิดขึ้นได้มากกว่า จึงปรากฏค่าเขตแบบคที่มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับ Greenwood (1979) พบว่า สตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณแอมิโลสสูงขึ้น จะมีค่าเขตแบบคที่สูงขึ้นด้วย สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าเขตแบบคในกลุ่มของสตาร์ช ที่ความเข้มข้นร้อยละ 7-8 ซึ่งตัวอย่างที่มีปริมาณแอมิโลสสูง (NWS) กลับมีค่าเขตแบบคต่ำกว่าตัวอย่างที่มีแอมิโลสต่ำ (HTS) ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากข้อสันนิษฐานเดียวกันกับค่าความหนืดสุดท้ายของตัวอย่างที่ความเข้มข้นเดียวกัน กล่าวคือ ลักษณะโมเลกุลของสตาร์ชทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกัน โดยโมเลกุลแอมิโลสใน NWS น่าจะมีโครงสร้างที่เป็นสายยาว ที่ความเข้มข้นต่ำ โมเลกุลของแอมิโลสจะอยู่ไกลกัน และเกิดพันธะใหม่ได้ยากกว่า แต่ในขณะที่โมเลกุลแอมิโลสของ KHS ซึ่งน่าจะมีโครงสร้างเป็นสายที่สั้นกว่า จึงเคลื่อนที่เข้าหากันได้ง่ายกว่า เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ได้ดีกว่า ซึ่งสอดคล้องกับ Collison (1968) ที่อธิบายการเกิดรีโทรเกรด และ

การกินตัวของสตาร์ชว่า สตาร์ชจะเกิดรีโทรเกรดได้ในปริมาณและอัตราเร็วที่ต่างกัน เนื่องจากความแตกต่างของชนิดของสตาร์ช น้ำหนักโมเลกุลของเอมิโลสที่แตกต่างกัน ความยาวของสายโมเลกุลของเอมิโลส โดยเอมิโลสที่เกิดรีโทรเกรดขึ้นได้มีความยาวของสายเอมิโลสปานกลาง (medium chain length) นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลของเอมิโลสมีผลเช่นเดียวกัน โดยโมเลกุลของเอมิโลสที่มีขนาดใหญ่จะเคลื่อนที่ได้ช้า ทำให้เกิดรีโทรเกรดในอัตราเร็วที่ช้าด้วย แต่เมื่อความเข้มข้นของตัวอย่างเพิ่มขึ้น ปริมาณเอมิโลสจึงเพิ่มขึ้น เอมิโลสสายยาวจึงจับตัวกันง่ายขึ้น สำหรับที่ความเข้มข้นร้อยละ 12 พบว่าค่าเซตแบคของตัวอย่างสตาร์ชมีค่าลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ลักษณะของตัวอย่างที่สังเกตได้จากการทดลอง มีลักษณะเกิดเป็นเจลแข็ง แต่เปราะ และแตกง่าย จึงทำให้ความหนืดที่เครื่องตรวจวัดได้มีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม ค่าเซตแบคของสตาร์ชกล้วยที่ความเข้มข้นร้อยละ 12 นี้ มีค่าแปรผันตามปริมาณเอมิโลสของตัวอย่างสตาร์ชชนิดนั้น ๆ ซึ่งสอดคล้องกับ Eggleston *et al.* (1992) พบว่าค่าเซตแบคของตัวอย่างสตาร์ชกล้วยที่มีปริมาณเอมิโลสสูงกว่าจะให้ค่าเซตแบคที่มากกว่ากล้วยกล้วยที่มีปริมาณเอมิโลสต่ำกว่า เช่นเดียวกับ Mota *et al.* (2000) พบว่า ค่าเซตแบคของตัวอย่าง แป้งกล้วยพันธุ์ Ouro colatina ซึ่งปริมาณเอมิโลสน้อยกว่า จะให้ค่าเซตแบคที่มีค่าต่ำกว่า (ประมาณ 780 เซนติพอยส์) พันธุ์ Mysore ที่มีปริมาณเอมิโลสมากกว่าด้วยเช่นกัน (1,210 เซนติพอยส์)

ตารางที่ 23 เขตแดนของแป้งและสตาร์ชจากกล้วยทั้ง 3 พันธุ์ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

(หน่วย: เซนติพอยส์)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น (ร้อยละ) ^{1/, 2/, 3/}				
	7	8	9	10	12
NWF	395.00 ± 9.899 aB	539.00 ± 4.243 bA	732.50 ± 53.033 cAB	1,227.00 ± 59.397 dB	2,794.50 ± 71.418 eD
HTF	590.00 ± 12.728 aC	892.00 ± 14.142 bB	1,149.00 ± 22.627 cC	1,353.50 ± 12.021 dC	1,520.50 ± 41.719 eC
KHF	343.50 ± 20.506 aA	511.00 ± 15.556 bA	718.50 ± 58.690 cA	979.50 ± 30.406 dA	1,437.50 ± 36.062 eC
NWS	558.50 ± 14.849 aC	1,501.50 ± 48.790 cD	2,650.00 ± 7.071 dD	3,043.00 ± 57.983 eD	886.00 ± 190.919 bB
HTS	1,258.50 ± 7.778 eE	1,200.50 ± 37.477 dC	894.00 ± 29.698 bB	895.00 ± 12.728 cA	334.00 ± 117.380 aA
KHS	1,119.00 ± 25.456 bD	1,611.50 ± 9.192 eE	1,469.50 ± 142.128 dC	1,198.50 ± 20.506 cB	410.00 ± 222.032 aA

หมายเหตุ ^{1/} ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ และ ± คือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
^{2/} อักษรตัวเล็กแสดงความแตกต่างในแนวนอนที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
^{3/} อักษรตัวใหญ่แสดงความแตกต่างในแนวตั้งที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3.4 สมบัติด้านความคงตัวต่อการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็ง

3.4.1 ผลของสายพันธุ์ต่อสภาวะของคืนรูปจากการแช่เยือกแข็ง

ปริมาณน้ำที่เหวี่ยงแยกออกจากเจลของตัวอย่างแป้ง และสตาร์ช แสดงดังตารางที่ 24 พบว่า ในกลุ่มของแป้ง สำหรับเจลปกติ (ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง) พบว่า HTF ปริมาณน้ำที่เหวี่ยงแยกออกจากเจลมากที่สุด คือ ร้อยละ 3.83 ในขณะที่ NWF มีปริมาณน้ำที่เหวี่ยงแยกออกจากเจลร้อยละ 2.27 และมีค่าใกล้เคียงกับ KHF (2.58) ($p>0.05$) สำหรับในกลุ่มสตาร์ช พบว่าเจล NWS มีปริมาณน้ำที่เหวี่ยงแยกออกน้อยที่สุด คือร้อยละ 1.40 ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$) กับเจล HTS และเจล KHS ซึ่งมีปริมาณน้ำที่เหวี่ยงแยกออกจากเจล ร้อยละ 1.21 และ 1.40 ตามลำดับ

ตารางที่ 24 ปริมาณน้ำที่เหวี่ยงแยกออกจากเจลของแป้งและสตาร์ชจากกล้วยแต่ละรอบการคืนรูปจากเยือกแข็ง

ตัวอย่าง	ปริมาณน้ำที่เหวี่ยงแยกออกจากเจล (ร้อยละ) ^{1/, 2/, 3/}		
	รอบที่ 0	รอบที่ 1	รอบที่ 2
NWF	2.27 ± 0.120 b	26.42 ± 3.59 d	45.35 ± 2.668 c
HTF	3.83 ± 0.863 c	10.95 ± 1.73 ab	20.81 ± 7.365 a
KHF	2.58 ± 0.231 b	19.96 ± 5.50 c	37.46 ± 5.693 b
NWS	1.20 ± 0.320 a	16.02 ± 4.58 cd	35.69 ± 3.183 b
HTS	1.40 ± 0.393 a	6.54 ± 1.77 a	16.02 ± 8.033 a
KHS	1.21 ± 0.277 a	12.78 ± 1.98 bc	35.32 ± 1.463 b

- หมายเหตุ
- ^{1/} เป็นค่าเฉลี่ยจากการตรวจสอบ 10 ครั้ง
 - ^{2/} ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p<0.05$)
 - ^{3/} ตัวเลขหลัง ± คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล

ปริมาณน้ำที่เหวี่ยงแยกออกจากเจลหลังคั่นรูปจากเยือกแข็ง 1 รอบ ของแป้งกล้วยน้ำว้า (ร้อยละ 26.42) มีค่าแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับแป้งกล้วยทุกสายพันธุ์ ส่วนเจล HTF มีปริมาณน้ำที่ถูกเหวี่ยงออกน้อยที่สุด (ร้อยละ 10.95) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่เหวี่ยงแยกออกจากเจลของสตาร์ชกล้วยพบว่า เจลNWSมีปริมาณน้ำที่เหวี่ยงออกมากที่สุด (ร้อยละ 16.02) และแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับเจลสตาร์ชทุกตัวอย่าง เจลสตาร์ชกล้วยหอมทองมีปริมาณน้ำเหวี่ยงน้อยที่สุด (ร้อยละ 6.54)

เจลแป้งกล้วยสายพันธุ์น้ำว้า มีปริมาณน้ำที่เหวี่ยงแยกออกจากเจลหลังคั่นรูปจากเยือกแข็ง 2 รอบมากที่สุด คือ ร้อยละ 45.35 และมีค่าแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับเจล KHF และเจล HTF ที่มีปริมาณน้ำที่ถูกเหวี่ยงแยกออก คือร้อยละ 37.46 และ 20.81 ตามลำดับ สำหรับในกลุ่มของสตาร์ชพบว่า เจล NWS และ เจล KHS มีปริมาณน้ำที่เหวี่ยงแยกออกจากเจลหลังคั่นรูปจากเยือกแข็ง 2 รอบมากกว่า เจล HTS ($p \leq 0.05$)

ความแตกต่างของตัวอย่างเจลของแป้ง และสตาร์ชจากกล้วย ที่พบจากงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากความแตกต่างทางด้านสายพันธุ์ และชนิดตัวอย่าง (แป้งหรือสตาร์ช) เนื่องจาก แต่ละสายพันธุ์มีความแตกต่างทางด้านลักษณะ โมเลกุลของสตาร์ช เช่น ขนาด และรูปร่างของเม็ดสตาร์ช โดยขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันนี้ น่าจะส่งผลให้สมบัติอื่น ๆ ของสตาร์ชมีความแตกต่างกันด้วย เช่น สมบัติทางด้านการพองตัว และการละลาย และรวมไปถึงการเกิดเจลทิโนเซนชัน และ รีโทรเกรเดชันของตัวอย่างแป้งและสตาร์ช (Singh *et al.*, 2003) จากการตรวจสอบพบว่า ปริมาณน้ำที่เหวี่ยงแยกออกของ NWF และ NWS ในภาวะที่ยังไม่มีการคั่นรูปจากการแช่เยือกแข็ง มีปริมาณใกล้เคียงกับ แป้งและสตาร์ชสายพันธุ์อื่น ๆ แต่เมื่อมีการคั่นรูป 1 และ 2 รอบ พบว่า ตัวอย่างดังกล่าว มีปริมาณน้ำที่ถูกเหวี่ยงออกเพิ่มมากขึ้น น่าจะเกิดสาเหตุมาจากปริมาณ และสัดส่วนของแอมิโลส และแอมิโลเพกทิน โดยตัวอย่างที่มีปริมาณแอมิโลสสูง จะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชันได้เร็วกว่า ตัวอย่างที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ (Chung *et al.*, 2006) อีกทั้งน่าจะมีส่วนเกิดจากลักษณะโครงสร้างของทั้งแอมิโลส และแอมิโลเพกทิน กล่าวคือ ลักษณะโมเลกุลที่เป็นสายสั้น หรือสายยาว ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน จากข้อสันนิษฐานจากผลการทดลอง เรื่องสมบัติเชิงความร้อน ซึ่งสันนิษฐานว่า โมเลกุลของแอมิโลสของ NWS น่าจะเป็น โมเลกุลสายยาวทำให้เกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลสได้ดี ในช่วงแรกของการเก็บรักษา ซึ่งเป็นผลจากอิทธิพลของแอมิโลรีโทรเกรด ดังนั้นจึงส่งผลให้มีปริมาณน้ำที่

ถูกเหวี่ยงแยกออกในช่วงแรกมีปริมาณน้อยกว่าตัวอย่างอื่น ๆ ที่ยังไม่สามารถเกิดรีโทรเกรดได้ สำหรับตัวอย่างสายพันธุ์หอมทอง (HT) พบว่า ถึงแม้จะมีปริมาณน้ำที่ถูกเหวี่ยงออกมากในภาวะเจลที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง แต่เมื่อมีการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็ง กลับพบว่า มีปริมาณน้ำที่ถูกเหวี่ยงออก น้อยกว่าตัวอย่างในสายพันธุ์อื่น ๆ ทั้งนี้ เนื่องมาจากกล้วยสายพันธุ์ HT มีปริมาณเอมิโลเพกทินสูงกว่าตัวอย่างอื่น ๆ ทำให้สมบัติของตัวอย่างแข็ง และสตาบิลิตีจากกล้วยสายพันธุ์นี้ มีความแตกต่างจากสายพันธุ์อื่นเช่นกัน กล่าวคือ เมื่อมีปริมาณของเอมิโลสต่ำ แสดงว่า ในระยะแรก (24 ชั่วโมง) ของการเกิดรีโทรเกรด จึงเกิดได้น้อย ส่งผลให้มีปริมาณน้ำที่ถูกเหวี่ยงแยกออกมามาก แต่เมื่อเวลานานขึ้น (48 ชั่วโมง) เอมิโลเพกทินของสตาบิลิตีกล้วยหอมสามารถมาจับกันมากขึ้น และเกิดเป็น โครงร่างผลึกที่มีความแข็งแรง สามารถเกิดรีโทรเกรดขึ้นได้ดีขึ้น โครงสร้างมีการจับกันอย่างแข็งแรงมากขึ้น ดังนั้น จึงมีปริมาณของน้ำที่ถูกเหวี่ยงออกน้อยลง

3.4.2 ผลของรอบการคืนตัวต่อร้อยละของปริมาณน้ำที่เหวี่ยงแยกออก

เมื่อพิจารณาตัวอย่างแต่ละสายพันธุ์ ในแต่ละรอบของการคืนรูป และเจลที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง พบว่าตัวอย่างสายพันธุ์กล้วยหอมทองมีปริมาณน้ำที่ถูกเหวี่ยงออกหลังจากการคืนรูปเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ทั้งในกลุ่มของแข็ง และในกลุ่มของสตาบิลิตี ส่วนสายพันธุ์น้ำว่าพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด

การเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่เหวี่ยงออกของแต่ละตัวอย่าง เมื่อรอบของการคืนรูปเพิ่มมากขึ้น อาจเป็นผลมาจาก อันตรกิริยาของสายเอมิโลเพกทิน กับส่วนของเอมิโลส ที่ละลายออกมานอกเมตสตาบิลิตี ซึ่งจะก่อให้เกิดบริเวณรอยต่อ หรือที่เรียกว่า junction zone ทำให้โมเลกุลมีลักษณะของโครงสร้างที่สามารถอุ้มน้ำไว้ได้ เมื่อมีการลดอุณหภูมิลง โครงสร้างจะมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้น และหนาแน่นมากขึ้น จนทำให้โมเลกุลของน้ำอิสระที่อยู่ในโครงสร้างดังกล่าวถูกบีบออกมานอกโครงสร้าง จึงทำให้มีปริมาณน้ำที่ถูกเหวี่ยงออกมา (Perera and Hoover, 1999) จากผลการตรวจสอบ ซึ่งพบว่า ในแต่ละรอบของการคืนตัว ตัวอย่างของกล้วยสายพันธุ์ต่าง ๆ มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำที่ถูกเหวี่ยงออกต่างกัน ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจาก ความสามารถในการรวมตัว (aggregation) และเกิดเป็น โครงร่างผลึกของโมเลกุลเอมิโลส (crystallization) นั้น จะสามารถเกิดได้ดีในช่วงเวลาสั้น ในขณะที่เอมิโลเพกทิน อาจต้องใช้เวลานานกว่า ดังนั้น จากผลการตรวจสอบ จึงอาจสันนิษฐานได้ว่า ในสภาวะของเจลที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง ปริมาณน้ำที่ถูกเหวี่ยงออกมาที่แตกต่างกัน เป็นผลมาจากการการจัดเรียงตัว และการรวม โครงสร้างขึ้นใหม่ของโมเลกุลเอมิโลส ในขณะที่ เมื่อมี

การคืนรูปจากการแช่เยือกแข็ง 1 และ 2 รอบ ความแตกต่างของปริมาณน้ำที่ถูกเหวี่ยงออกดังกล่าว เป็นผลมาจากโมเลกุลของแอมิโลเพกทิน ซึ่งสังเกตได้ว่า กล้วยสายพันธุ์หอมทอง (HT) มีปริมาณแอมิโลเพกทินมากกว่า จึงเกิดรีโทรเกรดได้มากขึ้น เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานกว่า อีกทั้งโครงสร้างของแอมิโลเพกทินที่มีโครงสร้างเป็นกิ่งก้าน สามารถกักเก็บโมเลกุลของน้ำได้ดีกว่า โมเลกุลแอมิโลสที่เป็นสายตรง ดังนั้นปริมาณน้ำที่ถูกเหวี่ยงออกจึงมีน้อยกว่า และมีการเปลี่ยนแปลงอัตราของน้ำที่เหวี่ยงออกที่น้อยกว่าด้วย ซึ่งจากผลดังกล่าว สอดคล้องกับ (Sodhi and Singh, 2003) ที่พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่ถูกแยกออกในช่วงระยะเวลาที่แตกต่างกัน มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการรวมตัวกัน และรวมเป็นโครงร่างผลึกของแอมิโลส และแอมิโลเพกทินที่แตกต่างกัน ในแต่ละช่วงเวลารักษา และการคืนรูป

ความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาเมื่อต้องนำไปทำผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็ง ซึ่งจากการตรวจสอบปริมาณน้ำที่เหวี่ยงแยกออกจากเจลพบว่าปริมาณน้ำที่เหวี่ยงแยกออกจากเจล NWS มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสูงกว่าสตาร์ชกล้วยสายพันธุ์อื่น ๆ แสดงว่ากล้วยสายพันธุ์น้ำว่า มีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งลดลง และสำหรับ HTS ถึงแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าสตาร์ชของตัวอย่างอื่น ๆ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชจากวัตถุดิบอื่น เช่น แป้งหรือสตาร์ชจากข้าว (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2546) พบว่า เจลจากตัวอย่างแป้ง และสตาร์ชจากกล้วย มีการเปลี่ยนแปลงที่มากกว่า แสดงว่ามีความคงทนต่อการแช่เยือกแข็งต่ำ จึงอาจไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็ง

3.5 สมบัติด้านเนื้อสัมผัสของเจล

โดยทั่วไป ผลิตภัณฑ์พื้นฐานที่มีแป้ง และสตาร์ชเป็นองค์ประกอบ จะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามชนิดและสมบัติของสตาร์ชที่เป็นแหล่งวัตถุดิบนั้น ๆ โดยสมบัติการเกิดเจลาทีโนเซชัน และรีโทรเกรเดชันของแป้ง และสตาร์ช เป็นสมบัติที่มีความสำคัญซึ่งจะส่งผลต่อลักษณะและความคงตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ซึ่งการวัดแบบเนื้อสัมผัสของเจลแป้ง และสตาร์ชหลังจากเกิดรีโทรเกรเดชัน โดยวิธี TPA (texture profile analysis) เป็นวิธีหนึ่งซึ่งใช้วัดเนื้อสัมผัสของตัวอย่าง โดยมีลักษณะการวัดที่คล้ายกับลักษณะของการบดเคี้ยวในปาก โดยมีการกดตัวอย่างสองครั้ง ค่าที่แสดงเป็นค่าความแข็งของเจล (hardness) ความสามารถในการเกาะตัวกัน (cohesiveness) และ ความยากง่ายในการเคี้ยว (gumminess) ซึ่งตัวอย่างที่นำมาทำการวัดเนื้อสัมผัส เป็นตัวอย่างของแป้ง และสตาร์ชที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 ที่ผ่านการวัดค่าความหนืดด้วยเครื่อง RVA แล้วนำตัวอย่างใส่ในหลอดนิตยา

ขนาด 15 ซีซี และทำการแช่แข็งที่ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ค่าที่ได้จากการวัดเนื้อสัมผัสของเจลแสดงดังตารางที่ 25

ตารางที่ 25 สมบัติด้านเนื้อสัมผัสของเจลจากแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยทั้ง 3 พันธุ์

ตัวอย่าง	ค่าทางด้านเนื้อสัมผัส ^{1/, 2/, 3/}		
	ความแข็ง (กรัม) (hardness)	ความเกาะตัวกัน (cohesiveness)	ความยากง่ายในการเคี้ยว (Gumminess)
NWF	212.32 ±50.560 a	0.38 ±0.084 a	83.17 ±32.460 a
HTF	363.32 ±61.762 b	0.48 ±0.016 b	174.47 ±35.086 b
KHF	538.97 ±141.183 c	0.57 ±0.066 c	316.78 ±134.802 c
NWS	956.69 ±16.801 e	0.81 ±0.044 f	777.67 ±55.312 f
HTS	596.35 ±27.501c	0.64 ±0.019 d	384.49 ±28.719 d
KHS	704.58 ±21.079 d	0.70 ±0.016 e	490.68 ±26.051 e
หมายเหตุ	^{1/}	เป็นค่าเฉลี่ยจากการตรวจสอบ 10 ครั้ง	
	^{2/}	ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถว มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)	
	^{3/}	ตัวเลขหลัง ± คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล	

3.5.1 ความแข็งของเจล (Hardness)

จากการตรวจสอบ พบว่าความแข็งของเจลที่ได้จากแป้ง และสตาร์ชกล้วยทั้งสามสายพันธุ์มีความแตกต่างกัน กล่าวคือ เมื่อพิจารณาตัวอย่างของกลุ่มแป้ง พบว่าตัวอย่างเจลจาก KHF มีความแข็งมากที่สุด (538.97 กรัม) ซึ่งมีค่าแตกต่างทางสถิติกับตัวอย่างเจล HTF (363.32 กรัม) และเจล NWF ที่มีค่าความแข็งน้อยที่สุด (212.32 กรัม) เมื่อพิจารณาในกลุ่มสตาร์ช พบว่า เจล NWS มีความแข็งมากที่สุด (956.69 กรัม) และมีค่าแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับตัวอย่างเจล KHS (704.58 กรัม) และเจล HTS ที่มีค่าต่ำที่สุด (ร้อยละ 596.35 กรัม)

ค่าความแข็งเป็นค่าที่แสดงถึงแรงที่ใช้จนเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของเจลตัวอย่าง ขณะที่มีการกดของหัววัดในครั้งแรก แสดงถึงความแข็งแรงของเจลที่ทำการวัด ความแข็งแรงของเจลที่ต่างกันเป็นผลมาจากความสามารถในการเกิดกระบวนการเกิดรีโทรเกรเดชันของ

ตัวอย่างแต่ละชนิด (Sandhu and Singh, 2007) ซึ่งระยะการเกิดรีโทรเกรเดชันในงานวิจัยนี้ ใช้เวลา 22 ชั่วโมง ดังนั้นจึงน่าจะเป็นการเกิดรีโทรเกรเดชันโดยอิทธิพลของโมเลกุลแอมิโลส มากกว่าแอมิโลเพกทิน เพราะความสามารถในการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลของแอมิโลสที่เป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก และเป็นสายตรง มีมากกว่าโมเลกุลของแอมิโลเพกทินที่มีขนาดใหญ่กว่า และมีกิ่งก้านมากกว่า (Gudmundsson, 1994) ปริมาณของแอมิโลสเป็นอิทธิพลอย่างหนึ่งต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของตัวอย่างในกลุ่มแป้ง พบว่าเจลของ KHF มีค่าความแข็งมากที่สุด ซึ่งกล้วยสายพันธุ์ไข่ (KH) มีปริมาณแอมิโลสน้อยกว่าพันธุ์น้ำว้า (NW) แต่กลับพบว่ามีค่าความแข็งมากกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความแข็งแรงของพันธะและความสามารถในการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของแอมิโลสของเจล KHF มีมากกว่าเจล NWF ข้อสันนิษฐานดังกล่าว เมื่อพิจารณาค่าความหนืดสุดท้ายของตัวอย่างที่วัดจากเครื่อง RVA ซึ่งเป็นค่าที่สามารถบอกแนวโน้มเบื้องต้นว่าตัวอย่างมีความสามารถในการเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากน้อยอย่างไร (Sandhu and Singh, 2007) เมื่อพิจารณาค่าความหนืดสุดท้ายของตัวอย่าง พบว่า KHF มีค่ามากกว่า NWF และ HTF จึงอาจเป็นไปได้ว่าเจล KHF น่าจะเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากกว่าเจล NWF นอกจากนี้อาจเป็นเพราะใน KHF มีปริมาณของไขมันน้อยที่สุด (ร้อยละ 1.56) ในขณะที่ NWF มีมากกว่า (ร้อยละ 2.15) และ HTF มีปริมาณไขมันมากที่สุด (ร้อยละ 4.88) ซึ่งไขมันสามารถขัดขวางการกลับมาจัดเรียงตัวใหม่ของแอมิโลส และแอมิโลเพกทินได้ ทำให้เกิดการรีโทรเกรเดชันได้ลดลง (Chung *et al.*, 2003; Gudmundsson, 1994) ดังนั้นตัวอย่างในกลุ่มสตาร์ชที่มีปริมาณของไขมันลดลงทั้ง 3 สายพันธุ์ จึงมีค่าความแข็งของเจลมากกว่าในกลุ่มของแป้ง แต่เมื่อพิจารณาเฉพาะในกลุ่มของสตาร์ช พบว่าค่าความแข็งของเจล น่าจะเกิดจากอิทธิพลของปริมาณแอมิโลส โดย เจลของ NWS มีค่าความแข็งมากที่สุด น่าจะเป็นเพราะมีปริมาณแอมิโลสสูงที่สุด สอดคล้องกับผลการตรวจสอบด้านความหนืด พบว่า กราฟความหนืดของ NWS ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 มีค่าความหนืดสุดท้าย และค่าเซตแบคสูงกว่า KHS และ HTS ดังนั้นจึงน่าจะเป็นไปได้ว่าสตาร์ช กล้วยน้ำว้า ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 เกิดการจัดเรียงตัวของแอมิโลสได้มากกว่า จึงเกิดรีโทรเกรดเนื่องจากแอมิโลสมากกว่า เจลที่ได้จึงมีความแข็งมากกว่าด้วย

3.5.2 ความสามารถในการเกาะตัวกัน (cohesiveness)

ค่าการเกาะตัวกัน แสดงถึงความแข็งแรงของพันธะภายในที่ก่อให้เกิดรูปร่างของผลิตภัณฑ์ คำนวณได้จากอัตราส่วนพื้นที่ของแรงที่ใช้ในการกดครั้งที่สองหารด้วยพื้นที่ของแรงในการกดครั้งแรก จากตารางที่ 25 พบว่า เจลของ KHF มีค่าความเกาะตัวกันมากกว่าเจล HTF และเจล NWF (0.57, 0.48 และ 0.38 ตามลำดับ) ซึ่งแป้งทั้ง 3 สายพันธุ์มีความแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อพิจารณาในกลุ่มของสตาร์ช พบว่า NWS (0.81) มีค่าความเกาะตัวกันสูงที่สุด และมีค่าแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับ KHS (0.70) และ HTS (0.64)

ความสามารถในการเกาะกันตัวอย่าง เป็นค่าอย่างหนึ่งที่แสดงว่าเนื้อสัมผัสเจลมีลักษณะเป็นอย่างไรเมื่อมีแรงกดอีกครั้ง เจลมีลักษณะแตกออกจากกัน หรือยังคงรูปร่างอยู่ได้ โดยถ้าเจลไม่แตกออกจากกันแสดงว่ามีความสามารถเกาะตัวกันมาก มีความแข็งแรงของพันธะมาก เจลของ KHF มีลักษณะยังคงรูปได้อยู่ เนื่องจากค่าความสามารถในการเกาะตัวกันมีค่าสูง เจลของ KHF จึงน่าจะมี ความแข็งแรงของพันธะมากกว่าเจลของ NWF และ HTF ในขณะที่กลุ่มของสตาร์ชพบว่า เจลของ NWS มีความแข็งแรงของพันธะมากกว่าเจลของ KHS และ HTS อีกทั้งยังมีความแข็งแรงของพันธะ มากกว่าในกลุ่มของแป้งในทุกตัวอย่างด้วย จากการวิเคราะห์นี้ พบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงและความสามารถในการเกาะตัวกัน โดยถ้าตัวอย่างมีค่าความแข็งแรงมาก จะมีค่าความเกาะตัวกันมากด้วย ความแตกต่างของค่าความแข็งแรง และความสามารถในการเกาะตัวกันของตัวอย่างเป็นผลมาจาก ความสามารถในการจัดเรียงตัวกันเป็นโครงร่างตาข่ายของโมเลกุลเอมิโลสมีอัตราเร็วแตกต่างกัน ซึ่ง ขึ้นอยู่กับปริมาณ รวมถึงลักษณะของโมเลกุลของสายเอมิโลส และ โครงสร้างของโมเลกุลเอมิโลเพกทิน (Singh *et al.*, 2006)

3.5.3 ความยากง่ายในการเคี้ยว (gumminess)

ความยากง่ายในการเคี้ยวเป็นค่าพลังงานที่ได้จากค่าความแข็งแรงคูณด้วยค่าความสามารถในการเกาะตัวกันของตัวอย่าง ซึ่งจากตารางที่ 25 พบว่าตัวอย่างเจลของ KHF มีความยากในการเคี้ยวมากกว่า (316.76) และมีค่าแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับเจล HTF (174.47) และเจลกล้วยน้ำว้า (83.17) ในขณะที่เจลจาก NWS มีค่าความยากง่ายในการเคี้ยวมากที่สุด (777.67) และมีค่าแตกต่าง

ทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับเจล HTS (384.49) และเจล KHS (490.68) โดยความสัมพันธ์ที่ได้มีลักษณะเป็นไปในทางบวกโดยถ้าตัวอย่างมีค่าความแข็งมาก ค่าความเกาะตัวกันมาก จะมีค่าความยากง่ายในการเคี้ยวมากด้วย ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจาก ความสามารถในการเกิดรีโทรเกรด และความแข็งแรงของพันธะที่ไม่เท่ากันของตัวอย่าง

3.6 การประเมินความสามารถในการนำแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยดิบไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร

จากสมบัติของแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยที่ตรวจสอบทั้งหมดนี้ สามารถนำมาประเมินเพื่อให้สามารถนำแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยดิบทั้ง 3 ชนิดนี้ไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารได้ โดยอาจนำแป้งหรือสตาร์ชไปใช้ในผลิตภัณฑ์ประเภทขนมอบเพื่อสุขภาพ หรืออาหารช่วยในการลดน้ำหนักได้ เนื่องจากมีสมบัติความเป็น resistant starch ซึ่งจะช่วยให้ผู้บริโภครู้สึกอิ่มนาน และให้แคลอรีต่ำกว่าการบริโภคสตาร์ชปกติ (Nugent, 2005) นอกจากนี้ Sajilata *et al.* (2006) ยังรายงานว่า การนำ resistant starch บางชนิดเติมลงไปใช้ในผลิตภัณฑ์ประเภท เค้ก มัฟฟิน บราวนี่ จะทำให้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เหล่านั้นดีขึ้น สามารถช่วยให้กลืนรสที่ได้จากผลิตภัณฑ์มีความนุ่มนวลมากขึ้น อีกทั้งยังมีความสามารถในการอุ้มน้ำได้น้อย (การละลาย และการพองตัวต่ำ) เมื่อนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมอบ จะทำให้เกิดความกรอบ และการขยายตัวที่ดี และยังช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้อีกด้วย หรืออาจนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความชื้นเหนียว (ความเหนียวสูง) ในผลิตภัณฑ์ประเภทเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพ นอกจากนี้ อาจนำไปใช้ในการผลิตสารเคลือบกลืนรส หรือยา (tablet coating, encapsulate) เพื่อให้มีการปลดปล่อยกลืนรส หรือตัวยาในระยะเวลาที่ต้องการ โดยเลือกระดับของ resistant starch ที่จะนำมาใช้เคลือบ

การนำไปใช้แป้งกล้วยไปใช้ในผลิตภัณฑ์ มีข้อจำกัดบางประการ คือ อาจต้องระวังปริมาณที่ใช้ด้วย เนื่องจาก หากใช้แป้งกล้วย ซึ่งเป็นแป้งที่ได้จากการนำผลกล้วยดิบผ่านกระบวนการอบแห้ง จึงทำให้แป้งที่ได้มีสีน้ำตาล ดังนั้นอาจทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีสีไม่เป็นที่ต้องการ อีกทั้งการเติมแป้งหรือสตาร์ชจากกล้วยมากเกินไป อาจลดปริมาตรของผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ เนื่องจาก การที่แป้งกล้วยมีความสามารถในการดูดความชื้นได้ง่าย (สมบัติของ resistant starch) (Thompson, 2000) จะทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเกิดการยุบตัว อีกประการหนึ่ง คือ การเติม resistant starch ลงไปอาจต้องคำนึงถึงปริมาณของพลังงานที่ควรได้รับต่อวันในการบริโภคอาหารชนิดนั้น ๆ ด้วย เนื่องจากการบริโภค resistant starch จะให้พลังงานต่ำกว่าการบริโภคสตาร์ชปกติ

นอกจากนี้การนำแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยดิบไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ที่มีกระบวนการให้ความร้อนสูง อาจทำให้ปริมาณของ resistant starch น้อยลงได้ เนื่องจากธรรมชาติของ resistant starch type 2 จะสามารถถูกทำลายได้ด้วยความร้อน และสภาวะการแปรรูปได้ ทำให้หลังจากสิ้นสุดกระบวนการแปรรูปแล้ว มีปริมาณของ resistant starch type 2 เหลืออยู่ไม่มากนัก (Thompson, 2000; Nugent, 2005; Sajilata *et al.*, 2006) แต่อย่างไรก็ตาม เมื่ออาหารที่มีปริมาณสตาร์ชสูง ผ่านกระบวนการให้ความร้อน และทำให้เย็นแล้ว จะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลของสตาร์ช หรือเกิดรีโทรเกรเดชันได้ ซึ่งลักษณะเช่นนี้ จะทำให้เกิด resistant starch type 3 ซึ่งปริมาณของ resistant starch ที่เกิดเพิ่มขึ้นนี้ ขึ้นอยู่กับกระบวนการความร้อนที่ให้ เช่น autoclaving หรือ การใช้ไมโครเวฟ การตัดแปรรสตาร์ชทางกายภาพ เช่น การตัดแปรรสตาร์ชที่มีการใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น (Heat-moisture treatment) หรือ annealing ก็เป็นวิธีที่ทำให้มีปริมาณของ resistant starch เพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ทั้งนี้ ปัจจัยที่ทำให้เกิด resistant starch ขึ้นอยู่กับความเป็นผลึกของสตาร์ชชนิดนั้น ๆ ปริมาณน้ำในระบบ ลักษณะเม็ดสตาร์ช สัดส่วนของแอมิโลส และแอมิโลเพกทิน ความยาวของโมเลกุลแอมิโลส และความสามารถในการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลแอมิโลส (Sajilata *et al.*, 2006)

อนึ่ง เมื่อพิจารณาสมบัติการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งของเจลแป้ง และสตาร์ชจากกล้วยดิบ พบว่า ตัวอย่างไม่สามารถทนสภาวะจากการคืนรูปดังกล่าวได้ ดังนั้น แป้ง และสตาร์ชจากกล้วยดิบ จึงไม่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็ง ซึ่งอาจต้องมีการพัฒนา โดยตัดแปรรสตาร์ชจากกล้วยดิบเพื่อให้มีความสามารถในการใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารได้ทุกชนิด