รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การปรับปรุงสมบัติของสตาร์ชจากกล้วยพันธุ์พื้นเมืองภาคใต้โดยวิธีทางกายภาพ และทางเคมีเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม

(Improvement properties of starches isolated from native southern banana by physical and chemical modification approaching to develop value-added products)

ผู้วิจัย

ผศ.ดร. ปิยรัตน์ ศิริวงศ์ไพศาล
ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่
อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

สนับสนุนโครงการวิจัย โดยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

บทคัดย่อ

สตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหิน มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ B (B-type) อุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลาติไนเซชัน (To) และอุณหภูมิการเกิดเพสท์ (Tp) ของสตาร์ชทั้งสองสายพันธุ์มีค่าใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามพบว่าปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ช กล้วยหิน (ร้อยละ 70.52) มีค่าสูงกว่าของสตาร์ชกล้วยนางพญา (ร้อยละ 60.16) จากผลการดัดแปรสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินด้วยวิธีความร้อนชื้น พบว่ารูปแบบโครงสร้างผลึกเปลี่ยนแปลงจากแบบ B เป็นแบบ A+B ค่ากำลังการพองตัว ความสามารถในการละลาย ค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว (k) และปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชกล้วยทั้งสองสายพันธุ์มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชกล้วยก่อนการดัดแปร ขณะที่ค่า To, Tp, storage modulus (G') และค่า instantaneous elastic (G_o) ของเจลสตาร์ช และความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์และกรดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) นอกจากนั้นพบว่าเมื่อระดับความชื้นที่ใช้ดัดแปรเพิ่มขึ้น (18 – 27%) ค่ากำลังการพองตัว ค่า k และปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชกล้วยทั้งสองสายพันธุ์มีค่าลดลง ขณะที่ค่า To G' และค่า G_o ของเจลสตาร์ช และความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์และกรดมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับผลการดัดแปรสตาร์ชกล้วยทั้งสองสายพันธุ์ด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชัน พบว่าค่ากำลังการพองตัว ความใส ค่า k ค่าความหนืดสูงสุด ค่า breakdown ความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์และกรดมีค่าสูงกว่าของสตาร์ชกล้วยก่อนการดัดแปร ขณะที่ค่า To, Tp, setback, G' และปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์มีค่าต่ำกว่าของสตาร์ช กล้วยก่อนการดัดแปร นอกจากนั้นพบว่าเมื่อระดับความเข้มข้นของสารโพรพิลีนออกไซด์เพิ่มขึ้น (8-12%) ค่ากำลังการพองตัว ความใส ค่า k ความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์และกรดมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่า To setback G' และปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์มีค่าลดลง

จากการประยุกต์ใช้สตาร์ช กล้วยที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันที่ระดับความเข้มข้นของสารโพรพิลีนออกไซด์ร้อยละ 12 ในผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ผลิตจากโดแช่เยือกแข็ง พบว่าค่าการยืดขยายตัว ค่าการต้านแรงดึง และค่าความเหนียวของโดไม่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บรักษาแบบแช่เยือกแข็ง 3 สัปดาห์ซึ่งเป็นผลให้ผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ผลิตได้มีความคงตัวที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับขนมปังที่ไม่เติมสตาร์ชดัดแปรนี้ จากการเสริมความแข็งแรงให้กับฟิล์มสตาร์ชข้าวโดยการเติมสตาร์ชกล้วยที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 พบว่าฟิล์มสตาร์ชข้าวมีค่าการต้านทานแรงดึงและค่าความใสเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าการยืดตัวเมื่อขาดและค่าการซึมผ่านไอน้ำลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มสตาร์ชข้าวที่ไม่ได้เติมสตาร์ชดัดแปรนี้

ABSTRACT

Both banana starches obtained from Nang paya and Hin showed B-type crystalline pattern. The initial gelatinization temperature (To) and pasting temperature (Tp) of both banana starches are similar. However, resistant starch content of banana starch from Hin (70.52%) was higher than that of from Nang paya (60.16%). After heat-moisture treatment (HMT), the crystalline pattern of both banana starches changed from B-type to A+B type. Their swelling power, solubility index, viscosity, consistency coefficient (k) and resistant starch content of this banana starch decreased, while the To, Tp, the storage modulus (G'), the instantaneous elastic (G_o) of starch gel, and susceptibility towards enzyme and acid hydrolysis increased significantly ($p<0.05$) comparing with native banana starches. As for the effect of moisture level of the treatment, increasing moisture content (18-27%) decreased the swelling power, k and resistant starch content. However, To, the strength of gel increased with increasing G' and G_o and the susceptibility towards hydrolysis by acid and *alpha*–amylase enzyme increased with increasing moisture level of the treatments. Hydroxypropylation was conducted to chemical modify for both native banana starches. The results showed that the swelling power, clarity, k, peak viscosity, breakdown and susceptibility towards enzyme and acid hydrolysis of both modified banana starches increased, while To, Tp, setback, G' and resistant starch content decreased significantly ($p<0.05$) comparing with native banana starches. In addition, increasing in concentration of propylene oxide (8-12%) the swelling power, clarity, k, peak viscosity, breakdown and susceptibility towards enzyme and acid hydrolysis increased, while To, Tp, setback, G' and resistant starch content decreased.

Hydroxypropylated banana starches (12% propylene oxide) were applied in bread product which produced from frozen dough. The results showed that extensibility, resistance to extension and stickiness of dough did not change during frozen storage of 3 weeks. This contributed to obtain the more stable bread product comparing with control bread without this modified starch. The rice starch films reinforced with heat-moisture treated banana starches (27% moisture content) were investigated. The higher tensile strength and clarity but the lower elongation at break and water vapor permeability were obtained as treated banana starches were applied.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง "การปรับปรุงสมบัติของสตาร์ชจากกล้วยพันธุ์พื้นเมืองภาคใต้โดยวิธีทางกายภาพ และทางเคมีเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม" สามารถดำเนินการจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การอนุเคราะห์สนับสนุนงบประมาณในการวิจัยภายใต้ทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ปีงบประมาณ 2551

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการแปรรูปอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตรทุกคน ที่ให้การช่วยเหลือเกี่ยวกับการเตรียมวัตถุดิบ และจัดหาอุปกรณ์ต่าง ๆ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการวิจัย

ผศ. ดร.ปิยรัตน์ ศิริวงศ์ไพศาล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	(2)
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(4)
สารบัญ	(5)
รายการตาราง	(7)
รายการภาพประกอบ	(111)
บทที่ 1 บทนำ	1
บทนำต้นเรื่อง	1
ตรวจเอกสาร	3
1. กล้วย	3
2. สตาร์ชกล้วย	5
2.1 ปริมาณอะมิโลสของสตาร์ชกล้วย	5
2.2 โครงสร้างของสตาร์ชกล้วย	5
2.3 สมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชกล้วย	8
3. การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีความร้อนชื้น	12
3.1 ผลของการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นต่อสมบัติทางโครงสร้างของสตาร์ช	13
3.2 ผลของการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นต่อสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ช	14
4. การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชัน (hydroxypropyration)	16
4.1 สารเคมีสำหรับใช้ในการดัดแปร	16
4.2 ปฏิกิริยาเคมีของการดัดแปร	17
วัตถุประสงค์	19
บทที่ 2 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ	20
วัสดุ	20
อุปกรณ์	20
วิธีการทดลอง	21
ตอนที่ 1 การผลิตสตาร์ชกล้วย องค์ประกอบทางเคมี ลักษณะทางโครงสร้าง และสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชกล้วย	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ตอนที่ 2 การดัดแปรสตาร์ชกล้วยด้วยวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี และการศึกษาลักษณะทางโครงสร้างและสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชกล้วยดัดแปร	23
ตอนที่ 3 การศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้สตาร์ชกล้วยดัดแปรด้วยวิธีทางกายภาพ	29
บทที่ 3 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	33
ตอนที่ 1 การผลิตสตาร์ชกล้วย องค์ประกอบทางเคมี ลักษณะทางโครงสร้าง และสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชกล้วย	33
ตอนที่ 2 การดัดแปรสตาร์ชกล้วยด้วยวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี และการศึกษาลักษณะทางโครงสร้างและสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชกล้วยดัดแปร	40
ตอนที่ 3 การศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้สตาร์ชกล้วยดัดแปรด้วยวิธีทางกายภาพ	72
ตอนที่ 4 การศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้สตาร์ชกล้วยดัดแปรด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมี	89
บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง	103
เอกสารอ้างอิง	106
ภาคผนวก	113

รายการตาราง

Table		Page
1.	Amylose content from various bananas.	5
2.	Shape and size of banana starches from different varieties.	7
3.	Crystallinity type of banana starches from different varieties.	8
4.	Chemical compositions of banana starches from Nang paya and Hin .	34
5.	Swelling power and solubility of banana starches from Nang paya and Hin.	39
6.	Crystallinity of native and heat-moisture treated banana starches at 18% (HMT_{18}), 21%(HMT_{21}), 24%(HMT_{24}) and 27%(HMT_{27}) moisture content.	42
7.	Swelling power and water solubility of native and heat-moisture treated banana starches at 18%(HMT_{18}), 21%(HMT_{21}), 24%(HMT_{24}) and 27%(HMT_{27}) moisture content.	44
8.	Gelatinization parameters of native and heat-moisture treated banana starches at 18%(HMT_{18}), 21%(HMT_{21}), 24%(HMT_{24}) and 27%(HMT_{27}) moisture content.	47
9.	Viscosity parameters from Rapid Visco Analyzer (RVA) of native and heat-moisture treated banana starches from Nang paya and Hin.	51
10.	Consistency coefficient (k) and Flow behavior index (n) of native and heat-moisture treated banana starches from Nang paya and Hin.	55
11.	Viscoelastic parameters of native and heat-moisture treated banana starches from Nang paya and Hin at paste concentration of 8% (w/w) and measurement at 1 Hz.	58
12.	Creep parameters of native and heat-moisture treated banana starches at concentration of 10% (w/w).	62
13.	Ratio of short-range molecular order to amorphous (RSA) and relative RSA at various storage times of native and heat-moisture treated at 27% moisture content of banana starch from Nang Paya.	66
14.	Ratio of short-range molecular order to amorphous (RSA) and relative RSA at various storage times of native and heat-moisture treated at 27% moisture content of banana starch from Hin.	66
15.	Resistant starch content of native and heat-moisture treated banana starches.	71

รายการตาราง (ต่อ)

Table Page

16. Hydroxypropylene content and molar substation (MS) of modified banana starches hydroxypropylated with propylene oxide of 8%, 10% and 12%. 72
17. Swelling power and paste clarity of native and modified banana starch hydroxypropylated with propylene oxide of 8%, 10% and 12%. 73
18. Gelatinization parameters of native and modified banana starch hydroxypropylated with propylene oxide of 10% (HP) 74
19. Viscosity parameters from Rapid Visco Analyzer (RVA) of native and modified banana starch hydroxypropylated with propylene oxide of 10% (HP) at 6% (w/w). 76
20. Consistency coefficient (k) and Flow behavior index (n) of native and modified banana starch hydroxypropylated with propylene oxide of 10% (HP) 77
21. Viscoelastic parameter of native and modified banana starch hydroxypropylated with propylene oxide of 10% (HP) at concentration of 8% (w/w) and at 1 Hz. 79
22. Ratio of short-range molecular order to amorphous (RSA) and relative RSA at various storage times of native starch and starch hydroxypropylated with propylene oxide of 12% from Nang paya. 82
23. Ratio of short-range molecular order to amorphous (RSA) and relative RSA at various storage times of native starch and starch hydroxypropylated with propylene oxide of 12% from Hin. 82 88
24. Resistant starch content of native and modified banana starch hydroxypropylated with propylene oxide of 8% (HP 8%), 10% (HP 10%) and 12% (HP 12%). 90
25. Properties of dough substituted with 12% hydroxypropylated banana starches (HP) before frozen storage. Banana starches obtained from Nang paya and Hin.
26. Effect of substitution with 12% hydroxypropylated banana starches (HP) and frozen storage times on extensibility of dough. Banana starches obtained from Nang paya and Hin. 91
27. Effect of substitution with 12% hydroxypropylated banana starches (HP) and frozen storage times on resistance to extension of dough. Banana starches obtained from Nang paya and Hin. 91

รายการตาราง (ต่อ)

Table Page

28. Effect of substitution with 10% hydroxypropylated banana starches (HP) and frozen storage times on dough stickiness. Banana starches obtained from Nang paya and Hin. 92

29. Effect of substitution with 12% hydroxypropylated banana starches (HP) and frozen storage times on proofing time of dough. Banana starches obtained from Nang paya and Hin. 93

30. Properties of bread substituted with 12% hydroxypropylated banana starches (HP) before frozen storage. Banana starches obtained from Nang paya and Hin. 94

31. Effect of substitution with 12% hydroxypropylated banana starches (HP) and frozen storage times on bread firmness. Banana starches obtained from Nang p7aya and Hin. 95

32. Effect of substitution with 12% hydroxypropylated banana starches (HP) and frozen storage times on specific volume of bread. Banana starches obtained from Nang paya and Hin. 96

33. Effect of substitution with 12% hydroxypropylated banana starches (HP) and frozen storage times on crumb color of bread. Banana starches obtained from Nang paya and Hin. 97

34. Effect of substitution with 12% hydroxypropylated banana starches (HP) and frozen storage times on crust color of bread. Banana starches obtained from Nang paya and Hin. 98

35. Tensile strength of rice starch film and rice starch film added with 15% of native and heat-moisture treated banana starches (27% moisture content, HMT_{27}). Banana starches obtained from Nang paya and Hin. 99

36. Elongation at break of rice starch film and rice starch film added with 15% of native and heat-moisture treated banana starches (27% moisture content, HMT_{27}). Banana starches obtained from Nang paya and Hin. 100

37. Water vapor permeability of rice starch film and rice starch film added with 15% of native and heat-moisture treated banana starches (27% moisture content, HMT_{27}). Banana starches obtained from Nang paya and Hin. 101

รายการตาราง (ต่อ)

Table Page

38. Transparency of rice starch film and rice starch film added with 15% of native and heat-moisture treated banana starches (27% moisture content, HMT_{27}). Banana starches obtained from Nang paya and Hin. 102

รายการภาพประกอบ

Figure Page

1. Morphology of starch granule from native unripe banana starch (A) and ripe banana starch (B) 6
2. Hydroxyalkylation reaction of between starch and propylene oxide. 17
3. SEM micrograph (x1000) of native banana starches from (a) Nang paya and (b) Hin 35
4. Particle size distribution of native banana starches from (a) Nang paya and (b) Hin. 36
5. Crystallinity pattern of native banana starches from Nang paya and Hin. 37
6. Swelling power of native banana starches from (●) Nang paya and (■) Hin. 39
7. SEM micrographs (x1000) of heat-moisture treated banana starches at 27% moisture content: Nang paya (a) and Hin (b) 40
8. Crystallinity pattern of native and heat-moisture treated banana starch from Nang paya at 18% (HMT_{18}), 21%(HMT_{21}), 24%(HMT_{24}) and 27%(HMT_{27}) moisture content. 41
9. Crystallinity pattern of native and heat-moisture treated banana starch from Hin at 18% (HMT_{18}), 21%(HMT_{21}), 24%(HMT_{24}) and 27%(HMT_{27}) moisture content. 42
10. Relationship of swelling power and solubility of heat-moisture treated banana starches from Nang paya and moisture content of the treatments. 44
11. Relationship of swelling power and solubility of heat-moisture treated banana starch from Hin and moisture content of the treatments. 45
12. Thermogram of native and heat-moisture treated banana starch from Nang paya at 18% (HMT_{18}), 21%(HMT_{21}), 24%(HMT_{24}) and 27%(HMT_{27}) moisture content. 46
13. Thermogram of native and heat-moisture treated banana starch from Hin at 18% (HMT_{18}), 21%(HMT_{21}), 24%(HMT_{24}) and 27%(HMT_{27}) moisture content. 47
14. Pasting profile (pH 7.0) of native and heat-moisture treated Nang paya banana starch at 18% (HMT_{18}), 21% (HMT_{21}), 24%(HMT_{24}) and 27%(HMT_{27}) moisture content. 49
15. Pasting profile (pH 7.0) of native and heat-moisture treated Hin banana starch at 18% (HMT_{18}), 21% (HMT_{21}), 24%(HMT_{24}) and 27%(HMT_{27}) moisture content. 50
16. Relationship of pasting temperature at pH 7.0 of heat-moisture treated banana starches from Nang paya (■) and Hin (◆) and moisture content of the treatments. 50

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

Figure Page

17. Relationship of apparent viscosity and shear rate of (a) native and (b) heat-moisture treated banana starches at 18%(□), 21%(△), 24%(○) and 27%(◇) moisture content. Banana starches obtained from Nang paya. 53

18. Relationship of apparent viscosity and shear rate of (a) native and (b) heat-moisture treated banana starches at 18%(□), 21%(△), 24%(○) and 27%(◇) moisture content.Bnana starches obtained from Hin. 54

19. Effect of frequency on G' and G" for native (+) and heat-moisture treated Nang paya banana starch (8% concentration) at 18% (□), 21% (△), 24% (○) and 27% (◇) moisture content. All samples were measured at 25°C and at 0.1-10 Hz. 56

20. Effect of frequency on G' and G" for native (+) and heat-moisture treated Hin banana starch (8% concentration) at 18% (□), 21% (△), 24% (X) and 27% (◇) moisture content. All samples were measured at 25°C and at 0.1-10 Hz. 57

21. Relationship of G' value of heat-moisture treated banana starches and moisture content of the treatments. 58

22. Creep compliance and creep recovery for native (+) and heat-moisture treated Nangpaya banana starch (10 % concentration) at 18% (□), 21%(△), 24%(○) and 27%(◇) moisture content. All samples were measured at 2% strain. 60

23. Creep compliance and creep recovery for native (+) and heat-moisture treated Hin banana starch (10 % concentration) at 18% (□), 21%(△), 24%(○) and 27%(◇) moisture content. All samples were measured at 2% strain. 61

24. FTIR spectra at various storage times for (a) native and (b) heat-moisture treated at 27% moisture content of Nang paya banana starch gel. 64

25. FTIR spectra at various storage times for (a) native and (b) heat-moisture treated at 27% moisture content of Hin banana starch gel. 65

26. Enzyme hydrolysis of native (+) and heat-moisture treated Nang paya banana starch at 18% (■), 21% (▲), 24% (●) and 27% (◆) moisture content. 68

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

Figure Page

27. Enzyme hydrolysis of native (+) and heat-moisture treated banana starch from Nangpaya (a) and Hin (b). Banana starches were modified by heat-moisture treatment at 18% (■), 21% (▲), 24% (●) and 27% (◆) moisture content. 68

28. Acid hydrolysis of native(+) and heat-moisture treated Nang paya bananastarch at 18%(■), 21%(▲), 24%(●) and 27%(◆) moisture content. 70

29. Acid hydrolysis of native(+) and heat-moisture treated Hin banana starch at 18%(■), 21%(▲), 24%(●) and 27%(◆) moisture content. 70

30. Relationship of apparent viscosity and shear rate of native starch and starch hydroxypropylated with propylene oxide (HPO) at various concentrations. Starch obtained from Nang paya banana. 78

31. Relationship of apparent viscosity and shear rate of native starch and starch hydroxypropylated with propylene oxide (HPO) at various concentrations. Starch obtained from Hin banana. 78

32. FTIR spectra at various storage times of banana starches (obtained from Nang paya (a) and Hin (b) hydroxypropylated with 12% propylene oxide. 81

33. Enzyme hydrolysis of native and modified banana starches from (a) Nang paya (b) Hin hydroxypropylated with propylene oxide of 8% (HP 8%), 10% (HP 10%) and 12% (HP 12%). 84

34. SEM micrograph (X5000) of banana starch hydroxypropylated with propylene oxide of 12% after attacking by porcine pancreatic ∝–amylase. Banana starch obtained from (a) Nang paya and (b) Hin. 86

35. Acid hydrolysis of native and modified banana starches from (a) Nang paya (b) Hin hydroxypropylated with propylene oxide of 8% (HP 8%), 10% (HP 10%) and 12% (HP 12%). 87

บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

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

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

ตรวจเอกสาร

1. กล้วย

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

1.1 สายพันธุ์กล้วย

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

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

กล้วยมีอยู่หลายชนิด จึงมีชื่อเรียกกันมากมาย อย่างไรก็ตาม นักวิทยาศาสตร์ได้แบ่งกลุ่มกล้วยไว้เป็น 5 กลุ่มใหญ่ ดังนี้

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

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

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

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

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

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

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

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

อร่อยแต่เพราะมีความนุ่มเหนียว เนื้อมีสีเหลือง เมื่อทำให้สุกจะมีสีเหลืองด่นชัดขึ้น จะได้ขนมที่น่ารับประทานมากยิ่งขึ้น (เบญจมาศ ศิลาย้อย, 2545)

2. สตาร์ชกล้วย

2.1 ปริมาณอะมิโลสของสตาร์ชกล้วย

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

Table 1. Amylose content from various bananas.

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

2.2 โครงสร้างของสตาร์ชกล้วย

2.2.1 ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชกล้วย

เมื่อพืชสังเคราะห์แสงได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวแล้ว จะมีกระบวนการลำเลียงน้ำตาลเหล่านั้นมาสู่ส่วนที่จะเก็บไว้เป็นพลังงาน โดยจะรวมน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเหล่านั้นเป็นพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลใหญ่ และเก็บไว้ในลักษณะกลุ่มก้อนที่เรียกว่า “เม็ดสตาร์ช” สตาร์ชต่างชนิดกันมีลักษณะ

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

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

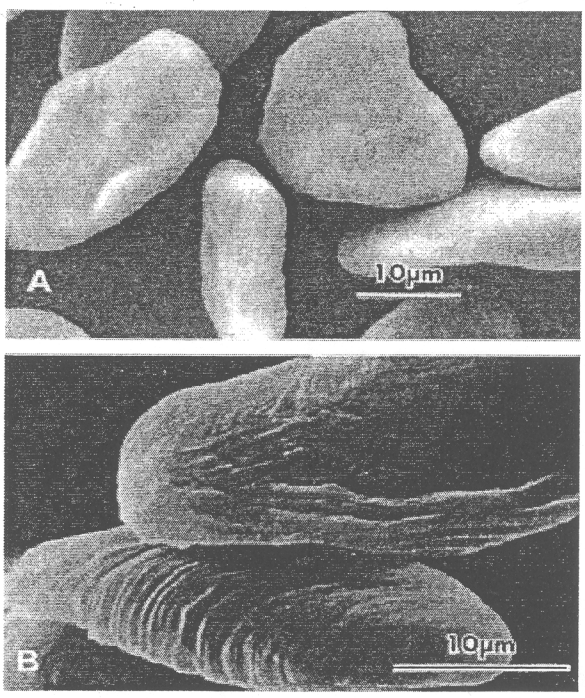


Figure 1 Morphology of starch granule from native unripe banana starch (A) and ripe banana starch (B)

ที่มา: Kayisu และ Hood (1981)

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

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

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

หมายเหตุ – หมายถึง ไม่มีข้อมูล

2.2.2 โครงสร้างผลึกของสตาร์ชกล้วย

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

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

ได้มีการศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึกของสตาร์ชกล้วย พบว่ามีโครงสร้างผลึกทั้ง 3 แบบ ดังแสดงใน Table 3

Table 3 Crystallinity type of banana starches from different varieties.

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

2.3. สมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชกล้วย

2.3.1 กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชกล้วย

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

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

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

2.3.2 การเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชกล้วย

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

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

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

2.3.3 สมบัติความหนืดของสตาร์ชกล้วย

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

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

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

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

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

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

3. การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีความร้อนชื้น

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

3.1 ผลของการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นต่อสมบัติทางโครงสร้างของสตาร์ช

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

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

ค่าลดลงเนื่องมาจากมีการจัดเรียงตัวใหม่ของสายอะมิโลสกับปริมาณไขมันที่หลงเหลืออยู่ในสตาร์ชระหว่างการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น

3.2 ผลของการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นต่อสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ช

3.2.1 ผลของการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นต่อสมบัติทางความร้อน

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

3.2.2 ผลของการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นต่อความสามารถในการพองตัวและการละลาย

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

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

3.2.3 ผลของการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นต่อความหนืดของสตาร์ช

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

3.2.4 ผลของการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นต่อสมบัติวิสโคอีลาสติก

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

3.2.5 ผลของการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นต่อสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชัน

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

4. การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชัน (hydroxypropyration)

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

4.1 สารเคมีสำหรับใช้ในการดัดแปร

สารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาชนิดนี้โดยทั่วไปแล้วสามารถใช้ได้ทั้งเอทีลีนออกไซด์หรือโพรพิลีนออกไซด์ แต่ส่วนใหญ่นิยมใช้โพรพิลีนออกไซด์ เนื่องจากสารโพรพิลีนออกไซด์เป็นสารที่ค่อนข้างใช้งานได้ง่ายและปลอดภัย โดยในปฏิกิริยานี้มีการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์และ

โซเดียมคลอไรด์ลงไปในสตาร์ชก่อนการเติมสารโพรพิลีนออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้เม็ดสตาร์ชสามารถพองตัวได้ดีขึ้นและสามารถดูบซับสารเคมีได้มาก ด้วยเหตุนี้การทำปฏิกิริยาในสภาวะเบสส่งผลให้สตาร์ชสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่โซเดียมคลอไรด์ไปช่วยลดการพองตัวของเม็ดสตาร์ชที่มากเกินไปจนอาจทำให้เกิดการเจลาติไนซ์

4.2 ปฏิกิริยาเคมีของการดัดแปร

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

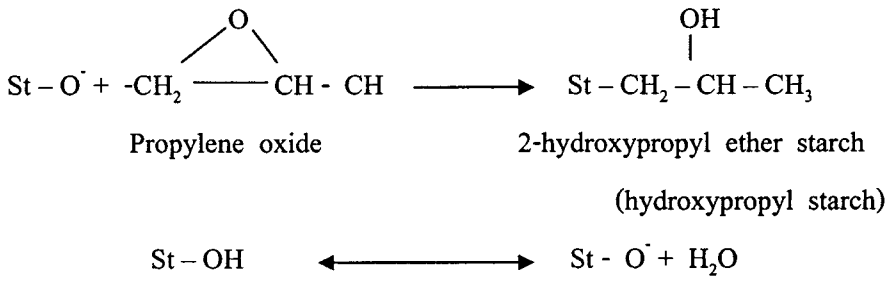


Figure 2. Hydroxyalkylation reaction of between starch and propylene oxide.

ที่มา : Sanders, 1996 อ้างโดย กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546

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

วัตถุประสงค์

1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้าง และคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหิน

2 ศึกษาผลของการดัดแปรทางกายภาพด้วยความร้อนชื้นต่อโครงสร้างและสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหิน

3 ศึกษาผลของการดัดแปรทางเคมีด้วยวิธีไฮดรอกซิลโพรพิเลชันต่อโครงสร้างและสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหิน

4 ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้สตาร์ชกล้วยที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีกายภาพและทางเคมีในผลิตภัณฑ์อาหารและบรรจุภัณฑ์

บทที่ 2

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

วัสดุ

1. วัตถุดิบ

- กล้วยนางพญาและกล้วยหินระยะการสุกที่ 1 (เปลือกมีสีเขียว ผลแข็ง ยังไม่มีการสุก) (Lii และคณะ, 1982)

2. สารเคมี

- สารเคมีที่ใช้ในการสกัดสตาร์ช คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์
- สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ กรดซัลฟูริก คอปเปอร์ซัลเฟต โพแทสเซียมซัลเฟต โซเดียมไฮดรอกไซด์ กรดไฮโดรคลอริก กรดบอริก โพแทสเซียมไฮโดรเจนพธาเลต เมทิลีนบลู เมทิลเรด แอลกอฮอล์ สารละลายไอโอดีน (analytical grade)

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับผลิตสตาร์ช

- เครื่องโม่แป้ง ยี่ห้อ central ประเทศไทย
- เครื่องบดผสม ยี่ห้อ Sharp รุ่น EM-11 ประเทศญี่ปุ่น
- ตู้อบลมร้อนแบบถาด ประเทศไทย
- เครื่องเหวี่ยงแยก ยี่ห้อ Hittich รุ่น Universal 16 ประเทศเยอรมัน
- ตะแกรงร่อนขนาด 250 ไมครอน ยี่ห้อ Fritsch ประเทศเยอรมัน

2. อุปกรณ์สำหรับการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นและวิธีการเกิดรีโทรเกรเดชัน

- เครื่องนวดผสมแป้ง ยี่ห้อ Thai mixer รุ่น KV-05 ประเทศไทย
- กระป๋องขนาด 307 x 108
- ตู้อบลมร้อน ยี่ห้อ Memmert ประเทศเยอรมัน
- เครื่องบดผสม ยี่ห้อ Sharp รุ่น EM-11 ประเทศญี่ปุ่น

3. อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ทางด้านเคมีและกายภาพ

- เครื่องวัดพีเอช ยี่ห้อ Sartorius ประเทศเยอรมัน
- เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Precisa รุ่น 1000C ประเทศสหรัฐอเมริกา
- เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น AL204 ประเทศสหรัฐอเมริกา
- เครื่องกวน (magnetic stirrer) ยี่ห้อ Fisher Scientific รุ่น LR 49683C ประเทศอังกฤษ

- เครื่อง vortex mixer ยี่ห้อ IKA รุ่น MS1 ประเทศเยอรมัน
- เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ ThermoSpectronic รุ่น G-20 ประเทศอังกฤษ
- อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ รุ่น W350 ยี่ห้อ Memmert ประเทศเยอรมัน
- นาฬิกาจับเวลา
- กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) ยี่ห้อ SEM รุ่น JSM-5800LV ประเทศญี่ปุ่น
- เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle Size Analyser) ยี่ห้อ COULTER รุ่น LS230 ประเทศสหรัฐอเมริกา
- เครื่องวัดปริมาณผลึก (X-Ray Diffractometer) ยี่ห้อ Phillips รุ่น X'Pert MPD ประเทศเนเธอร์แลนด์
- เครื่องอินฟาเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transfer Infrared Spectrometer, FTIR) ยี่ห้อ Bruker รุ่น IFS-48 ประเทศสหรัฐอเมริกา
- เครื่องวัดความหนืด (Rapid Visco Analyzer) ยี่ห้อ Newport Sciencetific รุ่น RVA-4 ประเทศออสเตรเลีย
- เครื่องวัดความหนืด (Rheometer) ยี่ห้อ Haake รุ่น RheoStressRS75 ประเทศเยอรมัน
- เครื่อง Differential Scanning Caloremeter ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น DSC7 ประเทศสหรัฐอเมริกา

วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 การผลิตสตาร์ชกล้วย องค์ประกอบทางเคมี ลักษณะทางโครงสร้าง และสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชกล้วย

1.1 การผลิตสตาร์ชกล้วย

ทำการผลิตสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหิน ด้วยวิธี Alkaline extraction โดยการปอกเปลือกกล้วยนางพญาดิบและหั่นเป็นแผ่นบางๆบดผสมด้วย NaOH 0.05 N. อัตราส่วน 1:5 (โดยน้ำหนักกล้วยต่อสารละลาย) กวนตลอดเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำมากรองผ่านตะแกรงขนาด 120 mesh นำส่วนที่กรองได้ไปเหวี่ยงแยกด้วยความเร็วรอบ 3500 rpm เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำตะกอนที่ได้มาละลายด้วยน้ำกรองจำนวน 3 ครั้ง อัตราส่วน 1:2 (โดยน้ำหนักตะกอนต่อน้ำกรอง) โดยแต่ละครั้งทำการเหวี่ยงแยกด้วยความเร็วรอบ 3500 rpm เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำตะกอนที่ได้มาละลายด้วยน้ำกรองด้วยอัตราส่วน 1:2 (โดยน้ำหนักตะกอนต่อน้ำกรอง) กรองผ่านตะแกรงขนาด 120 mesh ปรับค่า pH ให้ได้เท่ากับ 6.5-7 แล้วนำไปเหวี่ยงแยกด้วยความเร็วรอบ 3500 rpm เป็นเวลา 15 นาที นำตะกอนสตาร์ชที่ได้ ไปอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 45 °C จนมีความชื้นสุดท้าย 10-

12 % (โดยน้ำหนักเปียก) แล้วนำมาบดละเอียด ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 60 mesh เก็บใส่ภาชนะที่ป้องกันอากาศและความชื้น (ดัดแปลงจาก Eggleston *et. al* .,1992)

1.2 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชกล้วย

นำสตาร์ชกล้วยที่ผลิตได้จาก ข้อ 1.1 ไปวิเคราะห์ปริมาณความชื้น เถ้า โปรตีน ไขมัน เยื่อใย (AOAC, 1999) และปริมาณอะมิโลส (Shanty *et. al*., 1980)

1.3 ศึกษาลักษณะทางโครงสร้าง และสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชกล้วย

1.3.1 ศึกษาชนิดและปริมาณผลึกของสตาร์ชกล้วย

ศึกษาชนิด และปริมาณผลึกของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผลิตได้จากข้อ 1.1 ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) โดยบรรจุตัวอย่างสตาร์ช ลงในช่องใส่ตัวอย่าง จากนั้นทำการตรวจสอบการแทรกสอดของรังสี X-ray ที่มุม 2(Theta) ในช่วง 4-34 (40 kv, 30 mA, λ_{α} = 0.154 nm) คำนวณค่าร้อยละปริมาณผลึก โดยคำนวณอัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคที่ปรากฏต่อพื้นที่ทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.3.2 ศึกษารูปร่างของเม็ดสตาร์ชกล้วย

ศึกษาลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ชล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผลิตได้จากข้อ 1.1 ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) โดยนำตัวอย่างสตาร์ชมากระจายลงบนแท่นตัวอย่าง ทำการเคลือบผิวหน้าของตัวอย่างด้วยทอง นำตัวอย่างที่เตรียมเสร็จแล้วมาส่องด้วยกล้อง SEM ที่กำลังต่างๆ โดยกำหนดค่า kV เท่ากับ 10

1.3.3 ศึกษาขนาดและการกระจายตัวของขนาดเม็ดสตาร์ชกล้วย

ศึกษาขนาดและการกระจายตัวของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผลิตได้จากข้อ 1.1 ด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer (PSA) ใช้ He-Ne เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแสงที่ให้ความยาวคลื่นเท่ากับ 630 nm การวัดค่าครอบคลุมขนาดอนุภาค 0.05 ถึง 880 ไมโครเมตร โดยใช้น้ำกลั่นเป็นดิสเพิร์สเฟส (disperse phases) ทำการเตรียมตัวอย่างโดยนำสตาร์ชประมาณ 0.5 กรัมเติมลงในน้ำกลั่นแล้วทำให้เกิดการกระจายตัวด้วยเครื่องอัลตราโซนิค (ultrasonic) ประมาณ 5 นาที จากนั้นนำตัวอย่างไปวัดขนาดและการกระจายตัวของขนาดด้วยเครื่อง PSA

1.3.4 ศึกษากำลังการพองตัวและความสามารถในการการละลาย (swelling power and solubility)

ศึกษากำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผลิตได้จากข้อ 1.1 โดยเตรียมสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนักแห้ง จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ทำการดูดส่วนละลายส่วนใสแล้วนำไปอบแห้งที่

อุณหภูมิ 100 °C จากนั้นชั่งน้ำหนักสตาร์ชแห้งที่เหลือค้างอยู่เพื่อนำมาคำนวณค่าร้อยละการละลาย (สมการที่ 1) สำหรับตะกอนเปียกสตาร์ชเปียกในหลอดนำมาชั่งน้ำหนักสตาร์ชที่พองตัวเพื่อคำนวณค่ากำลังการพองตัว (สมการที่ 2) (ดัดแปลงจาก Schoch, 1964 และ Eliasson, 1985)

$$\text{ร้อยละการละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักสตาร์ชส่วนที่ละลายได้ในน้ำ (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักแห้งของสตาร์ช (กรัม)}} \quad (1)$$

$$\text{กำลังการพองตัว} = \frac{\text{น้ำหนักสตาร์ชที่พองตัว (กรัม)}}{\text{น้ำหนักแห้งของสตาร์ช (กรัม)}} \quad (2)$$

ตอนที่ 2 การดัดแปรสตาร์ชกล้วยด้วยวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี และการศึกษาลักษณะทางโครงสร้างและสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชกล้วยดัดแปร

2.1 การดัดแปรสตาร์ชกล้วยด้วยวิธีความร้อนชื้น

นำสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหิน มาทำการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้น โดยผันแปรระดับความชื้นของสตาร์ชเป็น 4 ระดับ (18%, 21%, 24% และ 27% โดยน้ำหนัก) นำสตาร์ชแต่ละตัวอย่างที่ผ่านการปรับความชื้น น้ำหนัก 200 กรัม ไปบรรจุในกระป๋องขนาด 307 X108 จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง นำสตาร์ชที่ได้ไปอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 45 °C จนมีความชื้นสุดท้าย 10-12 % (โดยน้ำหนักเปียก) แล้วนำไปบรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C (Sair, 1964 อ้างโดย Hoover and Manuel, 1996) จากนั้นนำสตาร์ชกล้วยนางพญาที่ผ่านการดัดแปรไปศึกษาลักษณะทางโครงสร้าง (ข้อ 2.3) สมบัติเชิงหน้าที่ (ข้อ 2.4) ระดับการถูกย่อยด้วยเอนไซม์และกรด (ข้อ 2.5 และ 2.6) และปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (ข้อ 2.7)

2.2 การดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชัน

นำสตาร์ชจากกล้วยจากกล้วยนางพญาและกล้วยหิน มาทำการดัดแปรด้วยวิธีวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชัน โดยเตรียมสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 40 (โดยน้ำหนักแห้งของสตาร์ช) จากนั้นเติมเกลือโซเดียมซัลเฟต(Na_2SO_4) ปริมาณร้อยละ 15 (โดยน้ำหนักแห้งของสตาร์ช) ทำการกวนและเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้นร้อยละ 5 เพื่อปรับพีเอชของสารละลายสตาร์ชให้เท่ากับ 10.5 เติมสารโพรพิลีนออกไซด์โดยผันแปรระดับความเข้มข้นเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 8 10 และ 12 (โดยน้ำหนักแห้งของสตาร์ช) แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องนานประมาณ ครึ่งชั่วโมง และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 40±2 องศาเซลเซียสนาน 24 ชั่วโมง (ดัดแปลงจาก Suwanliwong, 1998; Wattanachant *et al.*, 2003 และ Hung and Morita,

2005) จากนั้นนำสตาร์ชกล้วยที่ผ่านการดัดแปรไปตรวจหาปริมาณของไฮดรอกซีโพรพิล (ข้อ 2.2.1) แล้วนำไปคำนวณระดับการแทนที่ (degree of substitution, DS) และค่าการแทนที่โมลาร์ (molar substitution, MS) ดังข้อ 2.2.2 ศึกษาลักษณะทางโครงสร้าง (ข้อ 2.3) สมบัติเชิงหน้าที่ (ข้อ 2.4) ระดับการถูกย่อยด้วยเอนไซม์และกรด (ข้อ 2.5 และ 2.6) และปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (ข้อ 2.7)

2.2.1 การตรวจหาปริมาณของไฮดรอกซีโพรพิล

ชั่งสตาร์ชกล้วยที่ผ่านการดัดแปร 0.05-0.1 กรัม (โดยน้ำหนักแห้งของสตาร์ช) เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 นอร์มอล ปริมาตร 25 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวางในอ่างน้ำเดือดจนกระทั่งสตาร์ชละลายหมด แล้วทำให้เย็นและเจือจางด้วยน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตร ทำการปิเปตสารละลาย 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองขนาด 25 มิลลิลิตรและปิดฝาด้วยกับ glass stopper แล้วจุ่มหลอดลงในน้ำเย็น เติม 8 มิลลิลิตรของกรดซัลฟิวริก ผสมให้เข้ากันดีในหลอดทดลอง แล้วนำไปวางในอ่างน้ำเดือด 3 นาที จากนั้นนำหลอดทดลองไปแช่ในอ่างน้ำเย็นอย่างรวดเร็ว เมื่อสารละลายเย็นตัวลงเติมสารนินไฮดริน (ninhydrin) ปริมาตร 0.6 มิลลิลิตร และเขย่าโดยเร็ว จากนั้นนำหลอดทดลองไปวางในอ่างน้ำที่มีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 100 นาที แล้วปรับปริมาตรในแต่ละหลอดให้เท่ากับ 25 มิลลิลิตรด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น จากนั้นเทส่วนที่เป็นสารละลายอย่างรวดเร็วลงในเซลล์ใส่สารขนาด 1 เซนติเมตร หลังจาก 5 นาทีผ่านไป ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 590 นาโนเมตร (Johnson, 1969 อ้างโดย Suwanliwong, 1998)

ทำการเตรียมสารละลายมาตรฐานปริมาตร 1 มิลลิลิตร ของสารละลายโพรพิลีนไกลคอล (propylene glycol/ml) ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายโพรพิลีนไกลคอลแต่ละความเข้มข้นที่ความยาวคลื่น 590 นาโนเมตร จากนั้นนำไปสร้างกราฟมาตรฐาน

คำนวณร้อยละของไฮดรอกซีโพรพิล (% HP) โดยใช้สมการที่ (3) ดังนี้

$$\% \text{ HP} = \frac{\text{จำนวนของโพรพิลีนไกลคอล (ไมโครกรัม) x 0.7763 x 100 x 100}}{10^6 \text{ x น้ำหนักแห้งของสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปร}} \qquad (3)$$

2.2.2 การคำนวณระดับการแทนที่ (degree of substitution, DS) และค่าการแทนที่โมลาร์ (molar substitution, MS)

ระดับการแทนที่ (DS) และค่าการแทนที่โมลาร์ (MS) ของสตาร์ชกล้วยที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชัน สามารถคำนวณได้จากปริมาณของฟอสฟอรัสและ

ปริมาณของไฮดรอกซีโพรพิลของสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปร โดยใช้สมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ (Paschall, 1964; Rutenburg and Solarek 1984 อ้างโดย Suwanliwong, 1998)

$$\text{DS (Disodium salt)} = \frac{162P}{3100 - 124P} \quad (4)$$

เมื่อ ; P = % ฟอสฟอรัส (โดยน้ำหนักแห้งของสตาร์ช)

$$\text{MS (hydroxypropylated starch)} = \frac{\text{จำนวนโมลของไฮดรอกซีโพรพิเลชัน (HP)}}{\text{จำนวนโมลของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส}} \quad (5)$$

$$= \frac{\%\ HP}{59.08} \times \frac{162}{(100 - \%\ HP)}$$

2.3 ศึกษาลักษณะทางโครงสร้างของสตาร์ชกล้วยที่ผ่านดัดแปรด้วยวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี

2.3.1 ศึกษาชนิดและปริมาณผลึกของสตาร์ชกล้วย

ศึกษาชนิด และปริมาณผลึกของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผ่านการดัดแปรด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) โดยบรรจุตัวอย่างสตาร์ช ลงในช่องใส่ตัวอย่าง จากนั้นทำการตรวจสอบการแทรกสอดของรังสี X-ray ที่มุม 2(Theta) ในช่วง 4-34 (40 kv, 30 mA, λ_α = 0.154 nm) คำนวณค่าร้อยละปริมาณผลึก โดยคำนวณอัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคที่ปรากฏต่อพื้นที่ทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

2.3.2 ศึกษารูปร่างของเม็ดสตาร์ชกล้วย

ศึกษาลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ชของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผ่านการดัดแปรด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) โดยนำตัวอย่างสตาร์ชมากระจายลงบนแท่นตัวอย่าง ทำการเคลือบผิวหน้าของตัวอย่างด้วยทอง นำตัวอย่างที่เตรียมเสร็จแล้วมาส่องด้วยกล้อง SEM ที่กำลังต่างๆ โดยกำหนดค่า kV เท่ากับ 10

2.3.3 ศึกษาขนาดและการกระจายตัวของขนาดเม็ดสตาร์ชกล้วย

ศึกษาขนาดและการกระจายตัวของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผ่านการดัดแปรด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer (PSA) ใช้ He-Ne เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแสงที่ให้ความยาวคลื่นเท่ากับ 630 nm การวัดค่าครอบคลุมขนาดอนุภาค 0.05 ถึง 880 ไมโครเมตร โดยใช้น้ำกลั่นเป็นดิสเพิร์สเฟส (disperse phases) ทำการเตรียมตัวอย่างโดยนำสตาร์ชประมาณ 0.5 กรัม เติมลงในน้ำกลั่นแล้วทำให้เกิดการกระจายตัวด้วยเครื่องอัลตราโซนิค (ultrasonic) ประมาณ 5 นาที จากนั้นนำตัวอย่างไปวัดขนาดและการกระจายตัวของขนาดด้วยเครื่อง PSA

2.4 ศึกษาสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชกล้วยที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีทางเคมีและกายภาพ

2.4.1 ศึกษากำลังการพองตัวและความสามารถในการการละลาย (swelling power and solubility)

ศึกษากำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผ่านการดัดแปร โดยเตรียมสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนักแห้ง จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ทำการดูดส่วนละลายส่วนใสแล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 °C จากนั้นชั่งน้ำหนักสตาร์ชแห้งที่เหลือค้างอยู่เพื่อนำมาคำนวณค่าร้อยละการละลาย (สมการที่ 1) สำหรับตะกอนเปียกสตาร์ชเปียกในหลอดนำมาชั่งน้ำหนักสตาร์ชที่พองตัวเพื่อคำนวณค่ากำลังการพองตัว (สมการที่ 2) (ดัดแปลงจาก Schoch, 1964 และ Eliasson, 1985)

2.4.2 ศึกษาสมบัติการเกิดเจลาติไนเซชัน (Gelatinization property)

ศึกษาคุณสมบัติการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผ่านการดัดแปร โดยเตรียมตัวอย่างสตาร์ชต่อน้ำด้วยอัตราส่วน 1: 4 (โดยน้ำหนักแห้ง) จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เกิดสมดุลเป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างไปให้ความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) ที่อัตรา 10 ^{0}C/min ในช่วงอุณหภูมิ 10-95^{0}C (Lii *et al.*, 1995) ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิเริ่มต้น (T_0) อุณหภูมิสูงสุด (T_p) และอุณหภูมิสุดท้าย (T_c) ของการเกิดเจลาติไนเซชัน และพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชัน (ΔH)

2.4.3 ศึกษาสมบัติการเกิดเพสท์ (pasting behavior)

ศึกษาสมบัติการเกิดเพสท์ของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผ่านการดัดแปรด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) ในสภาวะที่เป็นกลาง(พีเอช 7.0) โดยใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 0.1 M และสภาวะที่เป็นกรด (พีเอช 3.5) โดยใช้สารละลายกรดอะซิติกเข้มข้นร้อยละ 30 โดยเตรียมสตาร์ชเข้มข้นร้อยละ 12 (โดยน้ำหนักแห้ง) ใส่ลงในถ้วยอะลูมิเนียม ตั้งโปรแกรมอุณหภูมิและเวลาให้ความร้อนดังนี้ ช่วงแรกเพิ่มอุณหภูมิจาก25 °C ให้สูงขึ้นในอัตรา 1.5 °C/min จนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 95 °C คงไว้ที่อุณหภูมินี้นาน 3 นาที จากนั้นค่อย ๆ ลดอุณหภูมิลงในอัตราเดียวกันจนถึงอุณหภูมิ 25 °C คงไว้ที่อุณหภูมินี้นาน 5 นาที บันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ วิเคราะห์อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดความหนืด(pasting temperature) ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ค่า breakdown และค่า setback (Whalen *et al.*, 1997)

2.4.4 ศึกษาพฤติกรรมการไหล (Flow behavior)

ศึกษาพฤติกรรมการไหลของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผ่านการดัดแปรโดยเตรียมสตาร์ชที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 4 (โดยน้ำหนักแห้ง) แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ

95 ^{0}C เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปวัดค่าความหนืดและค่าความเค้นเฉือนที่อัตราการเฉือนในช่วง 10-1000 s^{-1} ที่อุณหภูมิ 60 ^{0}C ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ (RheoStress, HAKKE, Germany) ซึ่งต่อกับหัววัดชนิด coaxial cylinder (Z41) ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดและความเค้นเฉือนกับอัตราการเฉือน ในรูปแบบสมการคณิตศาสตร์ คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว (consistency coefficient) และค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล (flow behavior index)

2.4.5 ศึกษาสมบัติวีสโคอีลาสติก (viscoelastic properties)

ศึกษาสมบัติสโคอีลาสติกของเจลสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผ่านการดัดแปร โดยเตรียมสตาร์ชที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 8 (โดยน้ำหนักแห้ง) แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 ^{0}C เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปวัดค่า storage modulus (G') loss modulus (G'') และค่า loss tangent (tan δ) ที่ช่วงความถี่ 0.1-10 Hz ที่อุณหภูมิ 60 ^{0}C ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ (RheoStress, HAKKE., Germany) ซึ่งต่อกับหัววัดชนิด cone and plate (CP4/40) (ทำการทดลองในช่วง linear viscoelastic ซึ่งมีค่า strain เท่ากับร้อยละ 2)

2.4.6 ศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)

ศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผ่านการดัดแปรด้วยเครื่อง FT-IR (Van Soest et. al., 1995) โดยเตรียมสารละลายสตาร์ชที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 (โดยน้ำหนักแห้ง) นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 15 นาที ทำให้เย็นลงจนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับ 30°C นำตัวอย่างไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นระยะเวลา 0, 2, 5, 8, 26,50 และ 70 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงอินฟาเรดที่ความถี่ช่วง 1200-800 cm^{-1} คำนวณสัดส่วนของโมเลกุลที่จัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ต่อส่วนอสัณฐาน (RSA) โดยคำนวณจากอัตราส่วนของค่าการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1047 cm^{-1} ต่อ 1022 cm^{-} ศึกษาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่า RSAกับเวลา

2.5 ศึกษาความสามารถในการถูกย่อยด้วยกรด

ศึกษาระดับการถูกย่อยด้วยกรดของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผ่านการดัดแปร (Hoover and Manuel, 1996) โดยชั่งตัวอย่างสตาร์ช 0.25 กรัม เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2.2 โมล 10 ml นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C จากนั้นทำตัวอย่างให้เป็นกลางด้วย 1 N NaOH นำตัวอย่างมาหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แยกสารละลายส่วนใส 1 มิลลิลิตร ไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธี Somogyi-Nelson (1944) แสดงดังภาคผนวก ก คำนวณระดับการถูกย่อยด้วยกรด ด้วยสมการที่ (6)

ระดับการถูกย่อยด้วยกรด = (ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ X 100) / (ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด) (6)

2.6 ศึกษาความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอ็นไซม์

ศึกษาระดับการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผ่านการดัดแปร (Zhang and Oates, 1999) โดยชั่งตัวอย่างสตาร์ช 0.2 กรัม เติมสารละลาย 0.1 M phosphate buffer (pH 7) ปริมาตร 2 มิลลิลิตร เติมเอนไซม์ *alpha*-amylase (porcine pancrease) 2520 U/g starch จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C ที่ความเร็วรอบของการเขย่า 150 รอบต่อนาที โดยเก็บตัวอย่างที่ 5, 10, 24, 30, 48, 54 และ 72 ชั่วโมง จากนั้นหยุดปฏิกิริยาของเอนไซม์ ด้วยสารละลาย $HgCl_2$ 0.4 mM นำหลอดตัวอย่างมาหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แยกสารละลายส่วนใส 1 มิลลิลิตร ไปบ่มที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 15 นาที และนำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธี Somogyi-Nelson (1944) แสดงดังภาคผนวก ก แล้วคำนวณระดับการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ ด้วยสมการที่ (7)

ระดับการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ = (ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ X 100) / (ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด) (7)

2.7 ศึกษาปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์

ศึกษาปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชกล้วยนางพญาทั้งก่อนและหลังการดัดแปรด้วยวิธีการเกิดรีโทรเกรเดชัน ด้วยวิธีของ McCleary and Monaghan (2002) โดยชั่งตัวอย่างสตาร์ช 0.1 กรัม ในหลอดที่มีฝาปิด จากนั้นเติมสารละลายเอนไซม์ pancreatic *alpha*-amylase ที่มีเอนไซม์ amyloglucosidase (AMG, 3 U/ml) 4 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน นำไปวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 37 °C ที่ความเร็ว 200 stroke/min เป็นเวลา 16 ชั่วโมง จากนั้นเติมเอทานอล (99%) 4 มิลลิลิตร แล้วนำตัวอย่างที่ได้ไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เทส่วนใสทิ้ง นำตะกอนที่ได้มาละลายด้วยเอทานอล (50%) 8 มิลลิลิตร แล้วนำตัวอย่างที่ได้ไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที (ทำซ้ำ 2 ครั้ง) นำตะกอนที่ได้มาเติม 2 โมล KOH ปริมาตร 2 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปกวนเป็นเวลา 20 นาที ในอ่างน้ำแข็ง เมื่อครบเวลาเติม 1.2 โมล sodium acetate buffer (pH 3.8) 8 มิลลิลิตร และเติมเอนไซม์ amyloglucosidase (AMG, 3,300 U/ml) 0.1 มิลลิลิตร โดยทันที ผสมให้เข้ากัน แล้วนำไปวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 30 นาที

จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้มาปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น ผสมให้เข้ากัน แล้วนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที นำตัวอย่างที่ได้ 0.1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดแก้ว (ทำ 3 ซ้ำ) เติมสารละลาย GOPOD 3 มิลลิลิตร แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 50 °C เป็น

เวลา 20 นาที แล้วจึงนำตัวอย่างที่ได้มาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร ด้วยสารลายควบคุม คำนวณปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (RS) ด้วยสมการที่ (8)

$$\text{ปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (RS \%)} = \Delta E \times (F/W) \times 90 \quad (8)$$

ΔE = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

F = 100 (mg D-glucose) / ค่าการดูดกลืนแสงของ 100 (mg D-glucose) ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

W = น้ำหนักแห้งของตัวอย่างสตาร์ช (กรัม)

2.8 ศึกษาความใสของแป้งเปียก (paste clarity)

ศึกษาความใสของแป้งเปียกสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรและที่ไม่ผ่านการดัดแปร โดยเตรียมแป้งเปียกสตาร์ชข้าวให้มีความเข้มข้นร้อยละ 1 (โดยน้ำหนักแห้งของสตาร์ช) จากนั้นนำไปให้ความร้อนในอ่างน้ำเดือด นาน 30 นาที และตั้งทิ้งไว้ให้เย็น ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง จากนั้นตรวจหาค่าความใสของแป้งเปียกสตาร์ชจากค่าร้อยละของการส่องผ่านที่ความยาวคลื่น 650 nm (% Transmittance, T_{650}) โดยใช้น้ำกลั่นเป็น blank (Kerr and Cleveland, 1959 อ้างโดย Suwanliwong, 1998)

2.9 การวางแผนการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely Randomized Design, CRD) ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดลองโดยใช้ (Analysis of variance, ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range test (DMRT)

ตอนที่ 3 การศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้สตาร์ชกล้วยดัดแปรด้วยวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี

3.1 การประยุกต์ใช้สตาร์ชกล้วยดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันในผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ผลิตจากโดแช่เยือกแข็ง

คัดเลือกสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันที่ระดับความเข้มข้นสารโพรพิลีนออกไซด์ร้อยละ 12 ซึ่งเป็นสตาร์ชดัดแปรที่มีการค่า setback และค่า RSA (short-range molecular order to amorphous) ที่ต่ำ ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มการเกิดการคืนตัว (retrogradation) ได้ต่ำ มาประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ผลิตจากโดแช่เยือกแข็ง

3.1.1 การผลิตขนมปังสูตรมาตรฐาน

ทำการผลิตขนมปังสูตรมาตรฐาน ซึ่งประกอบด้วยส่วนผสม ดังนี้ แป้งขนมปัง 300 กรัม น้ำตาล 10.8 กรัม นมผงปราศจากไขมัน 15 กรัม เนยขาว 18 กรัม ยีสต์แห้ง 4.2 กรัม เกลือ 4.5 กรัม น้ำ 180 กรัม โดยมีวิธีการผลิตดังนี้ ละลายยีสต์ด้วยน้ำปริมาณเล็กน้อยที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส แล้วเตรียมส่วนผสมของโดโดยใช้ส่วนผสมตามสูตรมาตรฐาน และใช้วิธีผสมแบบขั้นตอนเดียว (straight dough) โดยทำการผสมส่วนผสมต่างๆ ที่ใช้ในสูตรพร้อมกันพร้อมทั้งเติมสารละลายยีสต์ลงไปในชามผสม ทำการผสมด้วยความเร็วปานกลาง จนได้โดที่เรียบเนียน แห้งและมีความยืดหยุ่นดี ซึ่งใช้เวลาประมาณ 10 นาที เสร็จแล้วนำโดมาหมักครั้งที่ 1 เป็นเวลา 50 นาที ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำโดมาม้วนใส่พิมพ์ แล้วหมักครั้งที่ 2 เป็นเวลา 40 นาที อบในตู้อบอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จนได้ขนมปังที่สุกดี ซึ่งขนมปังที่ผลิตได้จะเป็นชุดควบคุมของการทดลอง (จิตธนา แจ่มเมฆ และอรอนงค์ นัยวิกุล, 2546) นำโดที่ผ่านการหมักครั้งที่ 2 และผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ผลิตได้ไปตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ดังข้อ 3.1.3 และข้อ 3.1.2 ตามลำดับ

สำหรับการศึกษาการประยุกต์ใช้สตาร์ชกล้วยดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันในผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ผลิตจากสูตรมาตรฐาน ทำได้โดยการเติมสตาร์ชกล้วยดัดแปรที่ระดับความเข้มข้นสารโพรพิลีนออกไซด์ร้อยละ 12 ทดแทนแป้งสาลีร้อยละ 15 โดยส่วนผสมอื่น ๆ วิธีการผลิต และการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ยังคงเดิม

3.1.2 การผลิตขนมปังจากโดแช่ยืดแข็ง

สูตรการผลิตเช่นเดียวกับการผลิตขนมปังสูตรมาตรฐาน(ข้อ 3.1.1) โดยมีวิธีการผลิตดังนี้ ละลายยีสต์ด้วยน้ำปริมาณเล็กน้อยที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส แล้วเตรียมส่วนผสมของโดโดยใช้ส่วนผสมตามสูตรมาตรฐาน และใช้วิธีผสมแบบขั้นตอนเดียว (straight dough) โดยทำการผสมส่วนผสมต่างๆ ที่ใช้ในสูตรพร้อมกันพร้อมทั้งเติมสารละลายยีสต์ลงไปในชามผสม ทำการผสมด้วยความเร็วปานกลาง จนได้โดที่เรียบเนียน แห้งและมีความยืดหยุ่นดี ซึ่งใช้เวลาประมาณ 10 นาที เสร็จแล้วนำโดมาหมักครั้งที่ 1 เป็นเวลา 50 นาที ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำโดมาม้วนใส่พิมพ์ ห่อด้วยฟิล์มพลาสติก นำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 °C แล้วเก็บรักษาเป็นเวลา 0 1 2 3 และ 4 สัปดาห์ นำ ตัวอย่างโดออกจากช่องแช่แข็ง ละลายน้ำแข็งด้วยไมโครเวฟที่ระดับความร้อนต่ำสุด เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นนำไปหมักครั้งที่ 2 เป็นเวลา 40 นาที แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 200 °C จนได้ขนมปังที่สุกดี นำโดที่ผ่านการหมักครั้งที่ 2 และผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ผลิตได้ไปตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ดังข้อ 3.1.3 และข้อ 3.1.2 ตามลำดับ

สำหรับการศึกษาการประยุกต์ใช้สตาร์ชกล้วยดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันในผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ผลิตจากโดแช่เยือกแข็ง ทำได้โดยการเติมสตาร์ชกล้วยดัดแปรที่ระดับความเข้มข้นสารโพรพิลีนออกไซด์ร้อยละ 12 ทดแทนแป้งสาลีร้อยละ 15 โดยส่วนผสมอื่น ๆ วิธีการผลิต และการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ยังคงเดิม

3.1.3 ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพของโด

3.1.3.1 ค่าความสามารถในการยืดขยายตัว (extensibility) ของโด

โดยนำโดมาวางบนแท่งแล้วนำมาวัดค่าความสามารถในการยืดขยายตัวด้วยเครื่อง Texture Analyzer (TA.XT2i) โดยใช้หัววัด Kieffer extensibility (Stable Micro Systems,UK,1995) โดยแปลผลแรงสูงสุด (positive peak force) เป็นค่าแรงต้านทานแรงดึง (resistance to extension) และระยะทางที่ตัวอย่างแยกออกจากกันเป็นค่าความสามารถในการยืดขยายตัว (extensibility)

3.1.3.2 ค่าความเหนียวของโด

วัดด้วยเครื่อง Texture Analyzer (TA.XT2i) โดยนำโดใส่ลงในภาชนะแล้วปิดฝาซึ่งที่ฝาจะ มีรูเล็ก ๆ สำหรับให้โดไหลออกมา หมุนสกรูด้านล่างของภาชนะเพื่อดันให้โดไหลผ่านสูง 1 มม. จากนั้นหมุนสกรูย้อนกลับเบา ๆ ใช้พลาสติกใสปิดโดไว้ ทิ้งไว้ 30 วินาที แล้วนำพลาสติกออก วัดความเหนียวของตัวอย่างโดยใช้หัวเข็มรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม.(P/ 25) แตะสัมผัสโด ประมวลผลโดยวัดค่าแรงจากจุดสูงสุดของกราฟ (Stable Micro Systems,UK,1995)

3.1.3.3 เวลาในการหมักโด (proofing time)

โดยนำโดบรรจุในกล่องหมักโดโดยให้ความสูงของโดเสมอกับขอบของกล่องหมัก จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 แล้วจับเวลาการหมักจนกระทั่งความสูงของโดสูงกว่าขอบด้านบนของกล่องหมักโดประมาณ 3 เซนติเมตร (Bhattacharya, *et al.*, 2003)

3.1.4 ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพของขนมปัง

3.1.4.1 ค่าสีของเปลือกนอกและเนื้อในของขนมปัง

ค่าสีของเปลือกนอกและเนื้อในของขนมปังจากโดแช่เยือกแข็งและขนมปังสูตรมาตรฐานในระบบ CIE Hunter Lab โดยใช้เครื่องวัดสี Hunter Lab

3.1.4.2 ความแน่นเนื้อ

ความแน่นเนื้อของขนมปังจากโดแช่เยือกแข็งและขนมปังสูตรมาตรฐาน โดยนำขนมปังมาผ่ันสไลด์ ให้มีความหนา 25 มม. ตัดหัวและท้ายออก นำตัวอย่างมาทดสอบค่าแรง

กดด้วยเครื่อง Texture Analyzer (TA.XT2i) โดยใช้หัววัดcylinder probe รัศมี 36 มม. (P/ 36R) กดทับร้อยละ 40 ของความสูงของตัวอย่างและอ่านค่าแรงกดที่ระยะกดร้อยละ 25 ของความสูงของตัวอย่าง (Stable Micro Systems,UK,1995)

3.1.4.3 ปริมาตรจำเพาะ

ปริมาตรจำเพาะ (specific volume) ของขนมปังจากโดแช่เยือกแข็งและขนมปังสูตรมาตรฐานโดยนำขนมปังที่ผ่านการอบมาชั่งน้ำหนักทันที จากนั้นวางขนมปังทิ้งไว้ให้เย็นลงแล้วนำไปวัดปริมาตรโดยวิธีการแทนทีด้วยเมล็ดงา (Nemeth , *et al* .,1996)

3.2 การประยุกต์ใช้สตาร์ชกล้วยที่ผ่านดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นในการเสริมความแข็งแรงให้กับฟิล์มที่ผลิตจากสตาร์ชข้าว

คัดเลือกสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นที่สตาร์ชดัดแปรมีความแข็งแรงของโครงสร้างสูงสุด มาประยุกต์ใช้เพื่อเสริมความแข็งแรงให้กับฟิล์มที่ผลิตจากสตาร์ชข้าว

ทำการเตรียมฟิล์มสตาร์ชข้าวหอมมะลิ โดยเตรียมสารละลายสตาร์ชที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 แล้วทำการเจลาติไนซ์ที่อุณหภูมิ 85 ^{0}C เป็นเวลา 5 นาที พร้อมกวนตลอดเวลา เติมพลาสติไซเซอร์ (ซอร์บิทอล) ในปริมาณ ร้อยละ 50 ของสตาร์ช และเติมสตาร์ชกล้วยดัดแปรด้วยความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 (HMT_{27}) ในปริมาณร้อยละ 15 ของสตาร์ชข้าว พร้อมกวนตลอดเวลาเป็นเวลา 2 นาที นำสารละลายฟิล์มที่ได้มาไล่ฟองอากาศ (vacuum dryer) แล้วทำการขึ้นแผ่นฟิล์มบนกะทะ Teflon และทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 ^{0}C องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 – 15 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการลอกแผ่นฟิล์มและเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 $\pm$ 2 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 72 ชั่วโมง แล้วนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ดังนี้ (Bourtoom และคณะ, 2008)

- ค่าการต้านทานแรงดึงสูงสุด ตามวิธี ASTM D882-91 (ASTM ,1995)
- ค่าการยืดตัวของแผ่นฟิล์มตามวิธี ASTM D882-91 (ASTM ,1995)
- ค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ ดัดแปลงจาก McHugh และคณะ (1993)
- วัดความใสของแผ่นฟิล์ม (Han and Floros, 1997)

3.3 การวางแผนการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely Randomized Design, CRD) ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดลองโดยใช้ (Analysis of variance, ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan 's Multiple Range test (DMRT)

บทที่ 3

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ตอนที่ 1. การผลิตสตาร์ชกล้วย และการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและทางโครงสร้างของสตาร์ชกล้วย

1.1 การผลิตสตาร์ชกล้วย

จากการศึกษาการผลิตสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินโดยคัดเลือกกล้วยที่มีเปลือกสีเขียวเข้ม (7.5 GY6/6) ซึ่งเป็นกล้วยที่มีระยะการสุกที่ 1 (เปลือกเขียว ผลแข็ง ยังไม่มีการสุก) (Lii *et al.*, 1982) โดยระยะการสุกที่ 1 มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่อยู่ในรูปของสตาร์ชสูง จึงเหมาะแก่การนำมาผลิตสตาร์ช ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮ--ดรอกไซด์ เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารที่สามารถย่อยผนังเซลล์ของเนื้อเยื่อกล้วยได้ (Chiang *et al.*, 1987) ดังนั้นเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตสตาร์ชจึงทำให้ผนังเซลล์ที่ห่อหุ้มสารต่างๆภายในเซลล์ถูกทำลาย สตาร์ชจึงสามารถหลุดออกมาได้ง่ายกว่าการสกัดด้วยสารละลายชนิดอื่น นอกจากนั้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถล้างเอาโปรตีนที่เกาะกับเม็ดสตาร์ชให้ละลายออกมาอยู่ในสารละลายได้ (Rayas-Duarte *et al.*, 1995) เมื่อพิจารณาปริมาณผลผลิต พบว่าของสตาร์ชกล้วยนางพญา (ร้อยละ 55.70 โดยน้ำหนักแห้ง) มีค่าสูงกว่าของสตาร์ชกล้วยหิน(ร้อยละ 33.71 โดยน้ำหนักแห้ง) และพบว่าปริมาณผลผลิตของสตาร์ชกล้วยหินมีค่าใกล้เคียงกับสตาร์ชจากกล้วยหักมุก และกล้วยน้ำว้าค่อม (วสันต์ ศิริวงศ์, 2543)

1.2 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชกล้วยนางพญาและกล้วยหิน

องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหิน แสดงดัง Table 4 จากการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนและไขมันที่ได้พบว่ามีค่าน้อย แสดงให้เห็นว่าสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองมีความบริสุทธิ์สูง และเมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีกับสตาร์ชจากกล้วยน้ำว้า กล้วยตานี และกล้วยหักมุก พบว่ามีค่าองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกัน (วสันต์ ศิริวงศ์, 2543) สำหรับปริมาณอะมิโลส พบว่าของสตาร์ชกล้วยนางพญา (ร้อยละ 17.09 โดยน้ำหนักแห้ง) มีค่าสูงกว่าของสตาร์ชกล้วยหิน (ร้อยละ 16.60 โดยน้ำหนักแห้ง) ซึ่งปริมาณอะมิโลสของสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองสายพันธุ์นีมีค่าใกล้เคียงกับของสตาร์ชกล้วย Fougamou (ร้อยละ17.16 โดยน้ำหนักแห้ง) สตาร์ช กล้วย Valery (ร้อยละ16 โดยน้ำหนักแห้ง) (Eggleston *et al.*, 1992; Ling *et al.*, 1982 และ Kayisu and Hood, 1981)

Table 4. Chemical compositions of banana starches from Nang paya and Hin.

Chemical composition	Nang paya	Hin
Moisture (%, db)	11.97 ± 0.56	10.93 ± 0.16
Fat (%, db)	0.01 ± 0.00	0.06 ± 0.02
Protein (%, db)	0.25 ± 0.16	0.13 ± 0.02
Ash (%, db)	0.18 ± 0.00	0.16 ± 0.01
Carbohydrate (%, db)	87.59	88.72
Amylose (%, db)	17.09 ± 0.09	16.60 ± 0.52

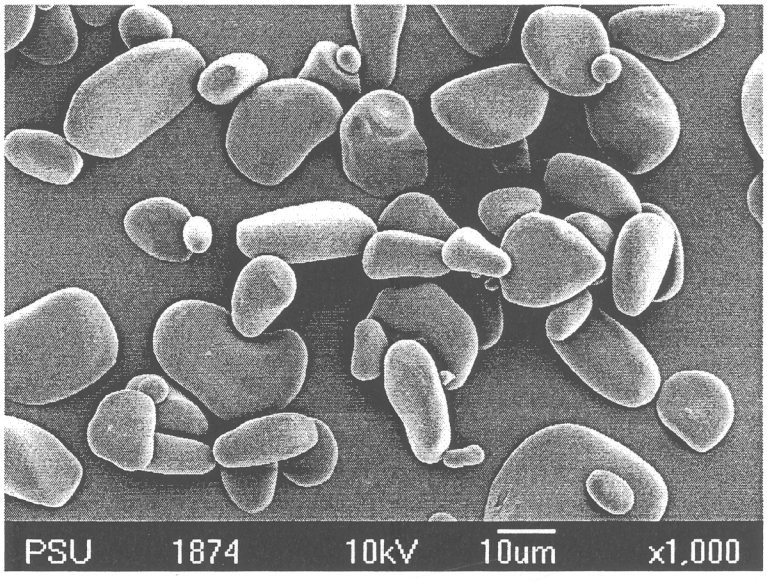
Note: Each value is mean of triplicate ± SD.

1.3 ลักษณะทางโครงสร้างของสตาร์ชกล้วย

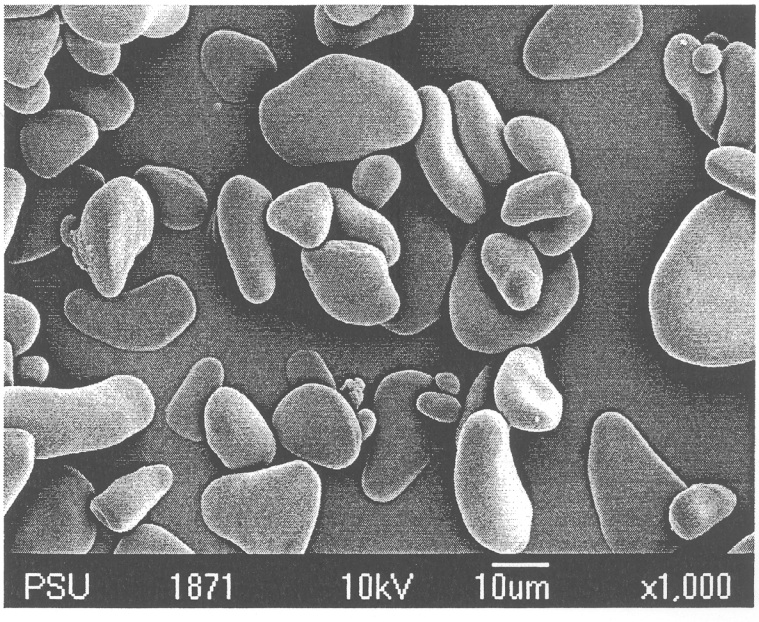
1.3.1 ลักษณะรูปร่างและขนาด (granular shape and size) ของเม็ดสตาร์ชกล้วยนางพญาและกล้วยหิน

จากการตรวจสอบลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ชด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าลักษณะรูปร่างและขนาดเม็ดสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินมีรูปร่างหลากหลาย ได้แก่ รูปร่างกลมคล้ายไข่ (ellipsoidal shape) รูปร่างแท่งยาว (elongated shape) รูปร่างสามเหลี่ยม (triangular shape) และมีรูปทรงที่ไม่แน่นอน (irregular shape) แสดงดัง Figure 3 และพบว่าลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ช มีลักษณะพื้นผิวที่เรียบ ไม่มีรอยแตกหัก แสดงให้เห็นว่าเม็ดสตาร์ชที่สกัดได้มีความสมบูรณ์และไม่ถูกทำลายในระหว่างขั้นตอนการสกัดหรือการบดร่อน ซึ่งเม็ดสตาร์ชที่มีความสมบูรณ์ส่งผลให้คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่ได้มีความถูกต้อง นอกจากนั้นเมื่อศึกษาการกระจายตัวของขนาดเม็ดสตาร์ชด้วยเครื่อง Laser Particle Size Analyzer (LPSA) ซึ่งเทคนิคการวัดด้วยเครื่อง LPSA นี้สามารถวัดได้ทั้งขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ช แสดงดัง Figure 4 โดยพบว่าสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคในช่วง 6.16 - 69.61 ไมโครเมตร และ5.61-63.41 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับสตาร์ชกล้วยไต้หวัน (20-60 ไมโครเมตร) (Lii *et al.*, 1982) สตาร์ชกล้วยหักมุก (13.20-66.71 ไมโครเมตร) และสตาร์ชกล้วยน้ำว้าค่อม (15.23-55.07 ไมโครเมตร) (วสันต์ ศิริวงศ์, 2543) นอกจากนั้นพบว่าขนาดของเม็ดสตาร์ชโดยเฉลี่ยของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินเท่ากับ 22.99 และ 23.68 ไมโครเมตร ซึ่งสอดคล้องกับสตาร์ช

กล้วย plantain (24.1-26.6 ไมโครเมตร) (Eggleston *et al.*, 1992) แต่พบว่ามีค่าต่ำกว่าขนาดของเม็ดสตาร์ชกล้วยหักมุก (30.81 ไมโครเมตร) และสตาร์ชกล้วยน้ำว้าค่อม (30.12 ไมโครเมตร) (วสันต์ ศิริวงศ์, 2543)



(a)



(b)

Figure 3. SEM micrograph (x1000) of native banana starches from (a) Nang paya and (b) Hin

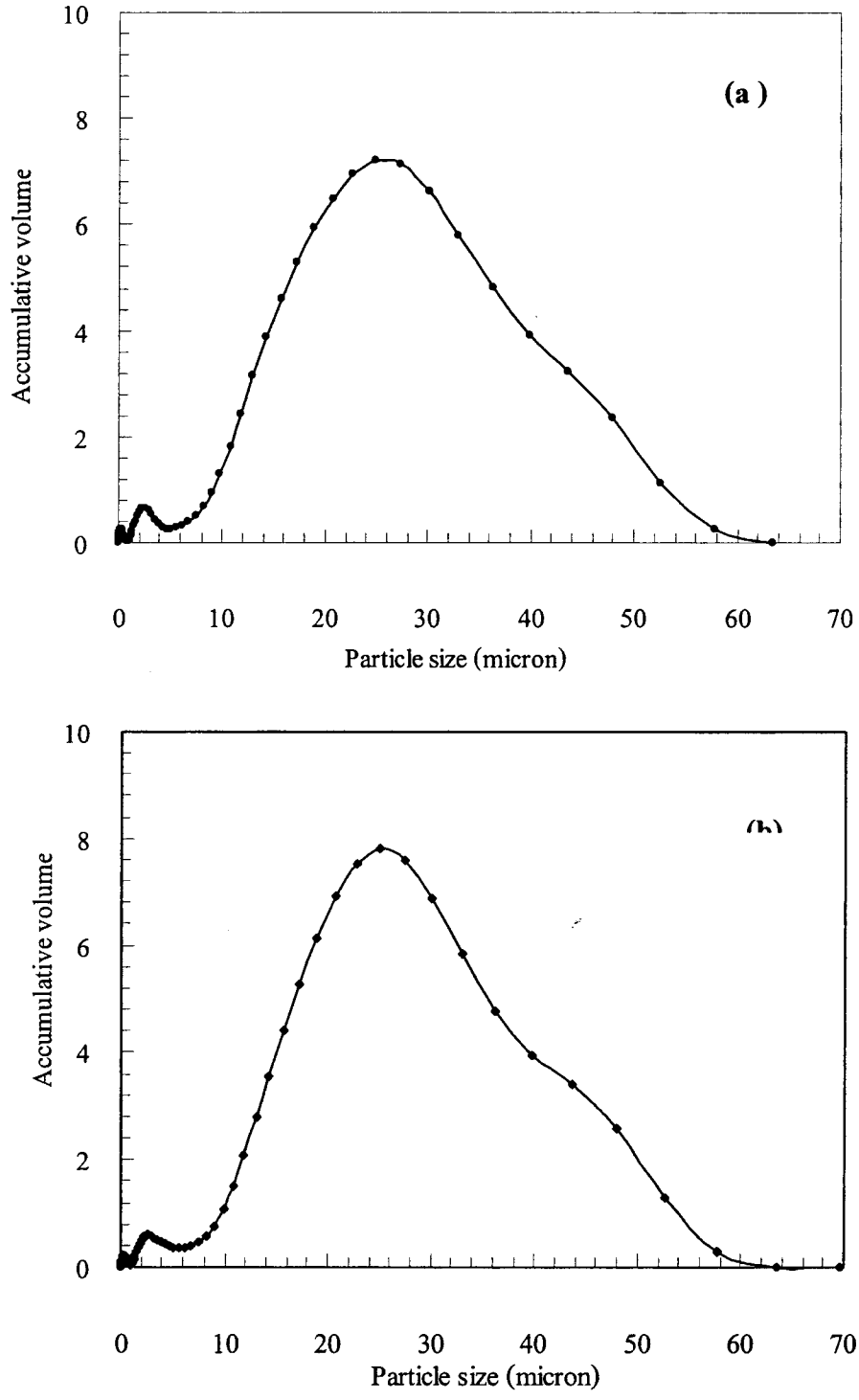


Figure 4. Particle size distribution of native banana starches from (a) Nang paya and (b) Hin.

1.3.2 โครงสร้างผลึก (crystallinity)

จากการตรวจสอบรูปแบบโครงสร้างผลึกของสตาร์ชด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) พบว่าสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินมีปริมาณผลึกร้อยละ 30.47 และ 37.73 ตามลำดับ และมีรูปแบบโครงสร้างผลึกที่มีพีคเด่นชัดที่มุม (2 Theta) เท่ากับ 5.92° 15.12° 17.32° และ 23.22° (Figure 5) ซึ่งเป็นรูปแบบของโครงสร้างผลึกแบบ B (Zobel, 1988) เช่นเดียวกันกับรูปแบบโครงสร้างผลึกที่ได้จากสตาร์ชกล้วยหักมุก สตาร์ชกล้วยน้ำว้าค่อม (วสันต์ ศิริวงศ์, 2543) และสตาร์ชกล้วยไต้หวัน (Lii *et al* ., 1982; Faisant *et al* ., 1995) ในขณะที่สตาร์ชกล้วยตานี (วสันต์ ศิริวงศ์, 2543) สตาร์ชกล้วย Varley (Waliszewski *et al*., 2003) และสตาร์ชกล้วย Musa paradisiace (Millan-Testa *et al*., 2005) มีรูปแบบของโครงสร้างผลึกแบบ C นอกจากนั้น Bello-Perez และคณะ (1999) ได้ศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึกของสตาร์ชกล้วยจากประเทศแมกซิโกสายพันธุ์ macho และ criollo พบว่ามีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบ A ซึ่งโดยทั่วไปแล้วลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A เป็นสตาร์ชที่ได้จากธัญพืช อย่างไรก็ตาม Zobel (1988) ได้เสนอว่ารูปแบบของโครงสร้างผลึกจากการศึกษาด้วยเครื่อง X-ray diffractometer ของสตาร์ชกล้วยอาจมีความแตกต่างกันได้ เนื่องจากกล้วยมีความหลากหลายของสายพันธุ์

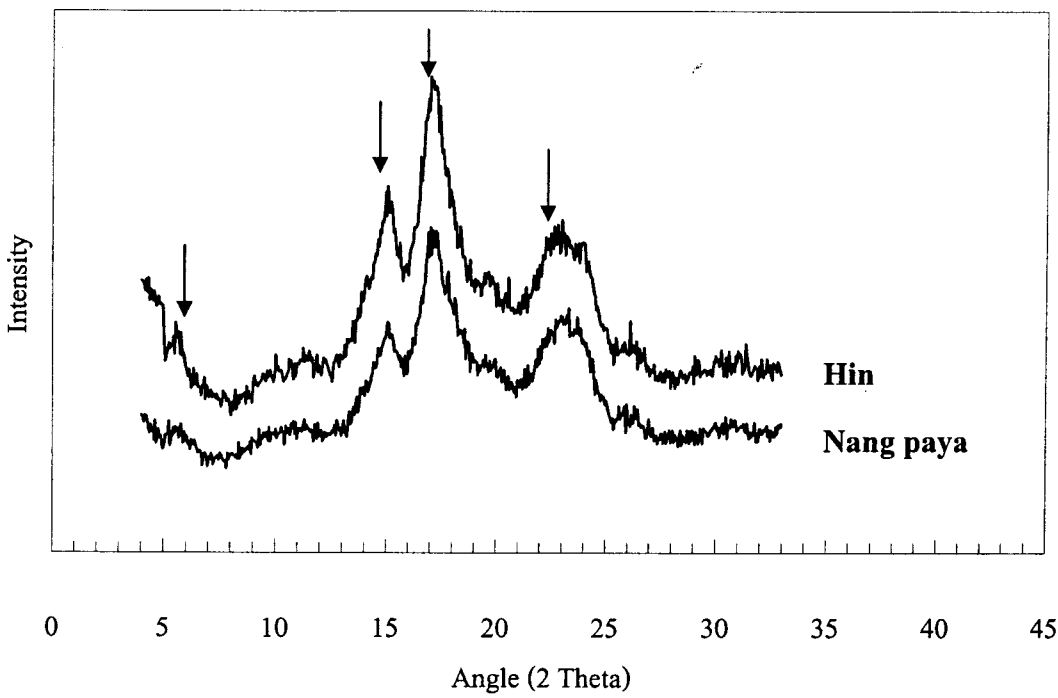


Figure 5. Crystallinity pattern of native banana starches from Nang paya and Hin.

1.3.3 กำลังการพองตัวและความสามารถในการละลาย

จากการศึกษาสมบัติการพองตัวและความสามารถในการละลายของสตาร์ชกล้วยนางพญาและกล้วยหิน ในช่วงอุณหภูมิ 50 - 90 องศาเซลเซียส โดยการพองตัวของเม็ดสตาร์ชเกิดจากการที่ระบบของสตาร์ชที่มีปริมาณน้ำเพียงพอ เมื่อได้รับความร้อนทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโมเลกุลต่างๆภายในเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย ทำให้โมเลกุลของน้ำที่อยู่ภายนอกเม็ดสตาร์ชสามารถเข้าไปจับกับไฮโดรเจนได้มากขึ้น เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัว สำหรับค่าความสามารถในการละลายเกิดจากการที่เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัว สายโมเลกุลของอะมิโลสซึ่งเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นสามารถหลุดออก (amylose leaching) มาอยู่ในสารละลายสตาร์ช (Hoover, 2001) จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส ค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองสายพันธุ์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) และพบว่าในช่วงอุณหภูมิ 50 - 60 องศาเซลเซียส สตาร์ชกล้วยมีค่ากำลังการพองตัวต่ำ เนื่องจากอุณหภูมิไม่มากพอที่จะทำลายโครงสร้างภายในของเม็ดสตาร์ช โมเลกุลของน้ำจึงเข้าไปจับกับหมู่ไฮดรอกซิลได้น้อย การพองตัวจึงเกิดได้น้อย โดยกำลังการพองตัวมีเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 60 - 95 องศาเซลเซียส (Table 5) นอกจากนี้พบว่าสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองสายพันธุ์แสดงรูปแบบการพองตัว 2 ขั้น ขั้นแรกในช่วงอุณหภูมิ 60 - 80 องศาเซลเซียส และขั้นที่ 2 ในช่วงอุณหภูมิ 80 - 95 องศาเซลเซียส แสดงดัง Figure 6 ซึ่งแสดงถึงแรงภายในพันธะของเม็ดสตาร์ชที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือพันธะบริเวณผลึกและพันธะบริเวณอสัณฐาน โดยสตาร์ชที่มีการพองตัวสองขั้นนี้จะมีจำนวนพันธะสูง แต่มีกำลังการพองตัวและการละลายต่ำเนื่องจากมีปริมาณอะไมโลสสูง ซึ่งปริมาณอะไมโลสจะทำให้โครงสร้างร่างแหในเม็ดสตาร์ชแข็งแรงขึ้น ทำให้พองตัวได้ต่ำ

จากการศึกษาความสามารถในการละลายของสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองสายพันธุ์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความสามารถในการละลายของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) และพบว่าค่าความสามารถในการละลายของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ซึ่งเท่ากับร้อยละ 9.61และ 8.58 ตามลำดับ (Table 2) การที่เม็ดสตาร์ชกล้วยมีความสามารถในการละลายเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนแก่สตาร์ชกล้วยมากขึ้น พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโมเลกุลของสตาร์ชสามารถถูกทำลายได้มากขึ้น นอกจากนั้นความร้อนที่สูงขึ้นทำให้ผิวหน้าของเม็ดสตาร์ชเกิดการแตกออกได้มากขึ้น จึงทำให้สายโมเลกุลของอะไมโลสสามารถถูกชะ (leaching) ออกมาจากภายในเม็ดสตาร์ชได้มากขึ้น

Table 5 Swelling power and solubility of banana starches from Nang paya and Hin

Temperature (°C)	Swelling power (g/g)		Solubility (%)	
	Nang phaya	Hin	Nang phaya	Hin
50	$1.84^{f} \pm 0.05$	$2.00^{f} \pm 0.08$	$1.35^{f} \pm 0.31$	$0.72^{f} \pm 0.28$
60	$2.30^{e} \pm 0.32$	$2.51^{e} \pm 0.49$	$1.88^{e} \pm 0.14$	$1.51^{e} \pm 0.34$
70	$8.33^{d} \pm 0.24$	$8.96^{d} \pm 0.69$	$3.24^{d} \pm 0.07$	$2.59^{d} \pm 0.19$
80	$17.42^{c} \pm 0.39$	$18.29^{c} \pm 0.57$	$7.49^{c} \pm 0.29$	$6.46^{c} \pm 0.31$
90	$22.28^{b} \pm 1.09$	$24.75^{b} \pm 1.10$	$9.61^{b} \pm 0.33$	$8.58^{b} \pm 0.15$
95	$25.72^{a} \pm 1.09$	$25.13^{a} \pm 1.10$	$15.64^{a} \pm 0.33$	$17.20^{a} \pm 0.15$

Note: Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in the column for each banana starch denote the significant differences.

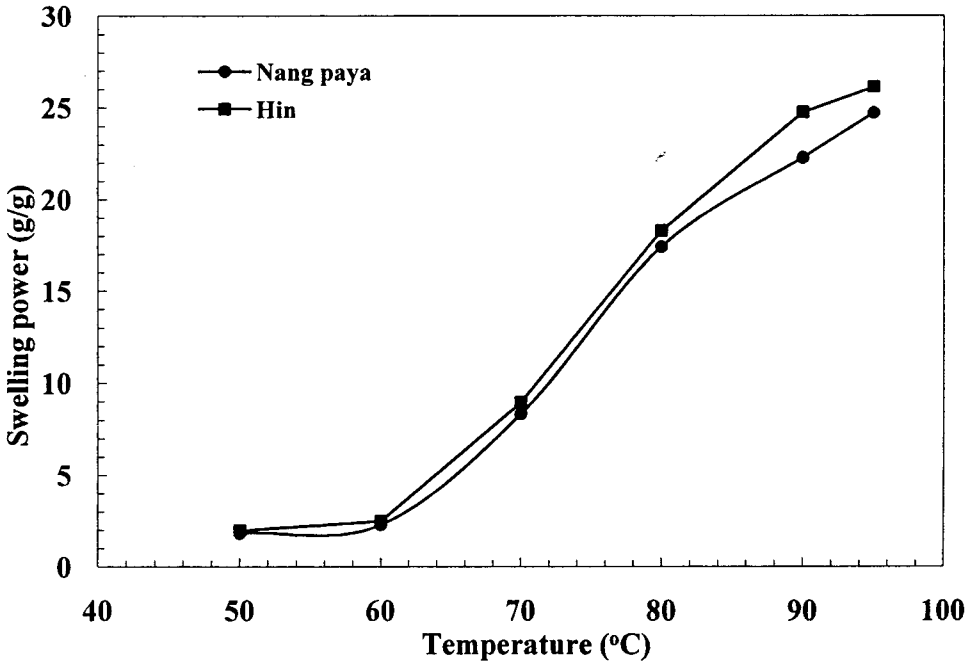


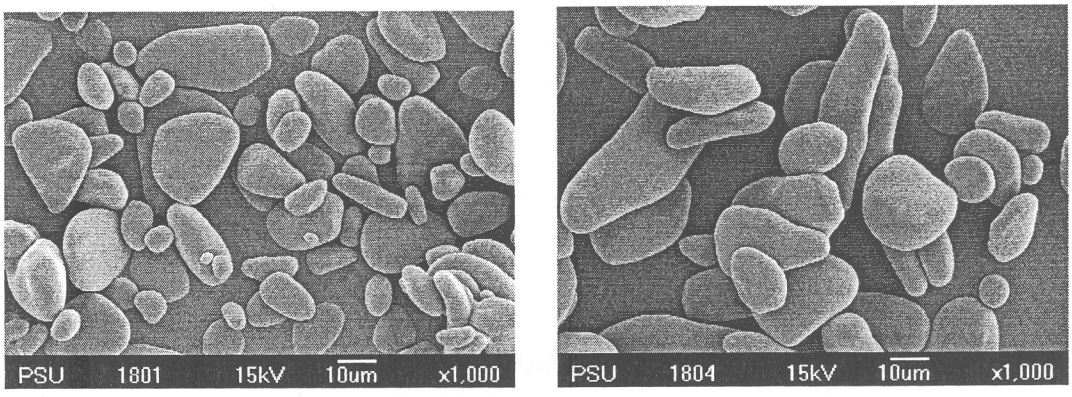
Figure 6. Swelling power of native banana starches from (●) Nang paya and (■) Hin.

ตอนที่ 2. การดัดแปรสตาร์ชกล้วยด้วยวิธีความร้อนชื้น (Heat-moisture treatment modification)

2.1 ผลของการดัดแปรสตาร์ชกล้วยนางพญาและกล้วยหินต่อลักษณะทางโครงสร้าง

2.1.1 ลักษณะรูปร่างและขนาด (granular shape and size) ของเม็ดสตาร์ชกล้วยนางพญาและกล้วยหิน

จากการตรวจสอบลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ชภายหลังการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าลักษณะรูปร่างและขนาดเม็ดสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยเม็ดสตาร์ชกล้วยภายหลังการดัดแปรยังคงมีความสมบูรณ์ และไม่เกิดความเสียหายจากผลของความร้อนชื้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นของสตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชมันฝรั่ง (Kulp and Lorenz, 1981) สตาร์ชมันสำปะหลัง (Abraham, 1993) สตาร์ชถั่ว (Hoover and Manuel, 1996a) สตาร์ชถั่วหรั่ง (Adebowale and Lawal, 2002) สตาร์ชถั่ว (Adebowale and Lawal, 2003) สตาร์ชข้าวฟ่าง (Adebowal *et al.*, 2005) และสตาร์ชข้าว (Khunae *et al* , 2007)



(a) (b)

Figure 7. SEM micrographs (x1000) of heat-moisture treated banana starches at 27% moisture content: Nang paya (a) and Hin (b)

2.1.2 โครงสร้างผลึก (Crystallinity)

จากการตรวจสอบรูปแบบโครงสร้างผลึกของสตาร์ชภายหลังการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นต่างๆ ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) พบว่ารูปแบบโครงสร้างผลึกของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินมีลักษณะเปลี่ยนไปจากรูปแบบ B เป็นรูปแบบ A+B ซึ่งมีพีคเด่นชัดที่มุม (2 Theta) เท่ากับ 5.92° 15.12 ° 17.32° 18.30 ° และ 23.43° (Figure 8) (Zobel, 1988) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นของสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันแกว (Gunaratne and Hoover, 2002) จากการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ B เป็น A+B ภายหลังการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้น อธิบายได้ว่าเป็นผลมาจากการระเหยของโมเลกุลน้ำที่อยู่ในบริเวณช่องว่างตรงกลางของโครงสร้างผลึกรูปแบบ B ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของสายโมเลกุลเกลียวคู่เข้าไปแทนที่ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึก (Gunaratne and Hoover, 2002) เมื่อพิจารณาปริมาณผลึก (crystallinity) ของสตาร์ชกล้วยทั้งสองสายพันธุ์หลังการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น พบว่ามีค่าต่ำกว่าของสตาร์ชกล้วยก่อนการดัดแปรอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แสดงดัง Table 6 แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อระดับความชื้นที่ใช้ในการดัดแปรเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณผลึกของสตาร์ชกล้วยทั้งสองสายพันธุ์มีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

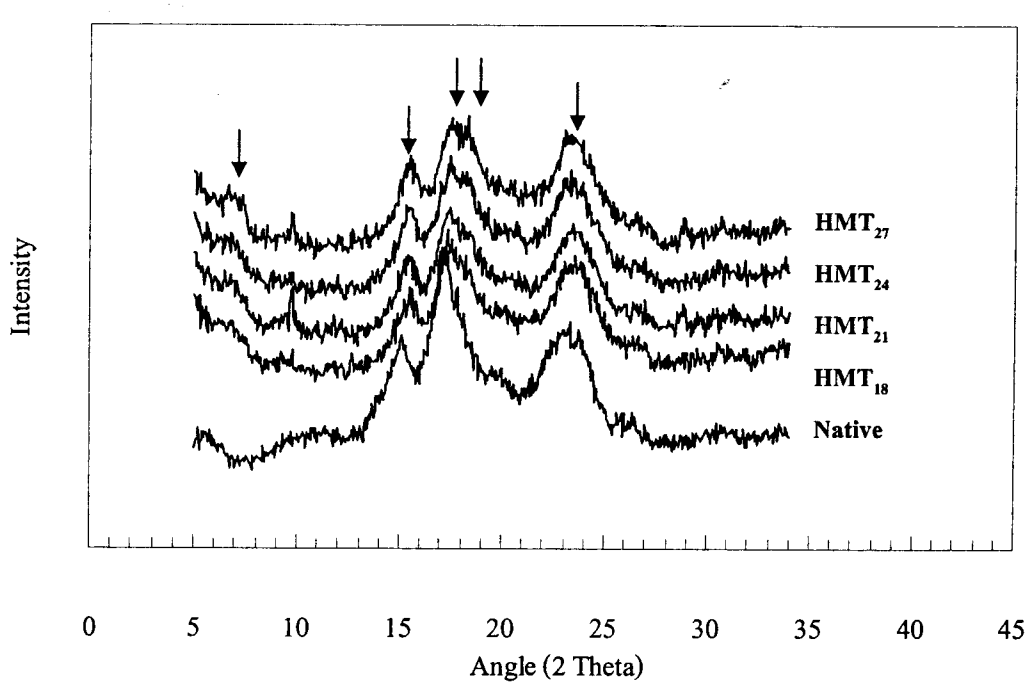


Figure 8. Crystallinity pattern of native and heat-moisture treated banana starch from Nang paya at 18% (HMT_{18}), 21% (HMT_{21}), 24% (HMT_{24}) and 27% (HMT_{27}) moisture content.

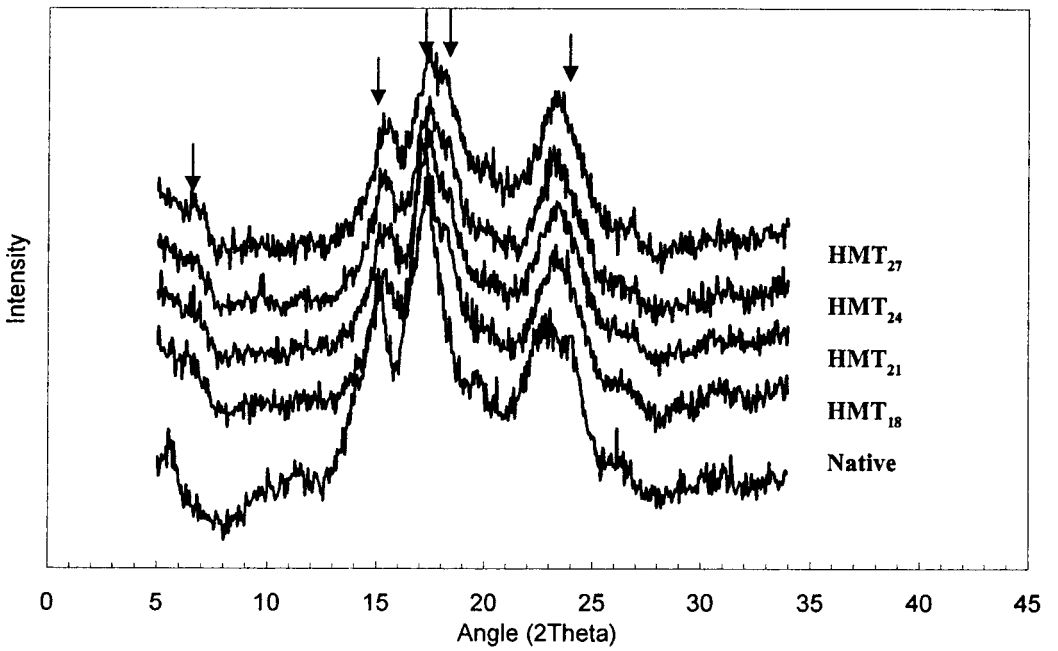


Figure 9. Crystallinity pattern of native and heat-moisture treated banana starch from Hin at 18% (HMT_{18}), 21% (HMT_{21}), 24% (HMT_{24}) and 27% (HMT_{27}) moisture content.

Table 6. Crystallinity of native and heat-moisture treated banana starches at 18% (HMT_{18}), 21% (HMT_{21}), 24% (HMT_{24}) and 27% (HMT_{27}) moisture content.

Treatment	Crystallinity (%)	
	Nang paya	Hin
Native	$36.81^{a} \pm 0.83$	$37.73^{a} + 0.23$
HMT_{18}	$33.51^{b} \pm 1.72$	$34.94^{b} \pm 2.43$
HMT_{21}	$34.02^{b} \pm 0.90$	$35.17^{b} \pm 1.02$
HMT_{24}	$33.28^{b} \pm 2.33$	$34.56^{b} \pm 1.68$
HMT_{27}	$33.47^{b} \pm 0.87$	$34.66^{b} \pm 6.35$

Note: Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in the column for each banana starch denote the significant differences.

2.2 ผลของการดัดแปรสตาร์ชกล้วยนางพญาและกล้วยหินต่อคุณสมบัติเชิงหน้าที่

2.2.1 กำลังการพองตัวและความสามารถในการละลาย (Swelling power and Solubility)

ศึกษากำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95°C พบว่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชกล้วยนางพญาและกล้วยหินก่อนการดัดแปรมีค่าเท่ากับ 25.72 และ 25.13 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความสามารถในการละลายมีค่าเท่ากับร้อยละ 15.64 และ 17.20 ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 7 ซึ่งค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชกล้วยทั้งสองสายพันธุ์มีค่าใกล้เคียงกับของสตาร์ชกล้วยหักมุก สตาร์ช กล้วยตานี และสตาร์ชกล้วยน้ำว้าค่อม ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 21.43-26.91 (วสันต์ ศิริวงศ์, 2003)

เมื่อทำการดัดแปรสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินด้วยความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นต่างๆ พบว่าค่ากำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชกล้วยก่อนการดัดแปร ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นของสตาร์ชธัญพืช สตาร์ชถั่ว สตาร์ชพืชหัว สตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวเฉี้ยงและสตาร์ชข้าวหอมมะลิ (Hoover and Vasanthan, 1994; Hoover and Manuel, 1996a,b; Kulp and Lorenz, 1981; Khunae *et al.*, 2007) อธิบายได้ว่าการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของสายโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ชทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโมเลกุลอะมิโลสกับอะมิโลส (AM-AM) และ/หรือ อะมิโลสกับอะมิโลเพคติน(AM-AMP) จึงทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ชเพิ่มมากขึ้น กำลังการพองตัวจึงมีค่าลดลงและสายโมเลกุลที่อยู่ภายในเม็ดสตาร์ชหลุดออกมาอยู่ในสารละลายสตาร์ชได้น้อยลง (Hoover and Manuel, 1996a,b; Gunaratne and Hoover, 2002) นอกจากนั้นจากผลการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ของระดับความชื้นที่ใช้ในการดัดแปรกับค่ากำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายของสตาร์ชกล้วยทั้งสองสายพันธุ์เป็นแบบเชิงเส้น ($R^2 = 0.97$, $p < 0.05$) แสดงดัง Figure 10 และ Figure 11 โดยพบว่าเมื่อระดับความชื้นที่ใช้ในการดัดแปรมีเพิ่มขึ้น ค่ากำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายมีค่าลดลง

Table 7. Swelling power and water solubility of native and heat-moisture treated banana starches at 18% (HMT_{18}), 21% (HMT_{21}), 24% (HMT_{24}) and 27% (HMT_{27}) moisture content.

Treatment	Swelling power		Solubility (%)	
	Nang paya	Hin	Nang paya	Hin
Native	$24.72^{a} \pm 0.45$	$26.13^{a} \pm 0.75$	$15.64^{a} \pm 0.88$	$17.20^{a} \pm 0.68$
HMT_{18}	$16.23^{b} \pm 0.10$	$16.19^{b} \pm 0.07$	$10.30^{b} \pm 0.40$	$9.07^{b} \pm 0.40$
HMT_{21}	$14.10^{c} \pm 0.30$	$13.28^{c} \pm 0.27$	$7.20^{c} \pm 0.83$	$7.85^{c} \pm 0.48$
HMT_{24}	$12.84^{d} \pm 0.16$	$10.83^{d} + 0.30$	$5.68^{d} \pm 0.56$	$5.46^{d} \pm 0.42$
HMT_{27}	$10.86^{e} \pm 0.65$	$8.20^{e} + 0.17$	$3.82^{e} \pm 0.89$	$3.50^{e} \pm 0.28$

Note: Each value is mean of triplicate ± SD. The difference superscripts in the column for each banana starch denote the significant differences.

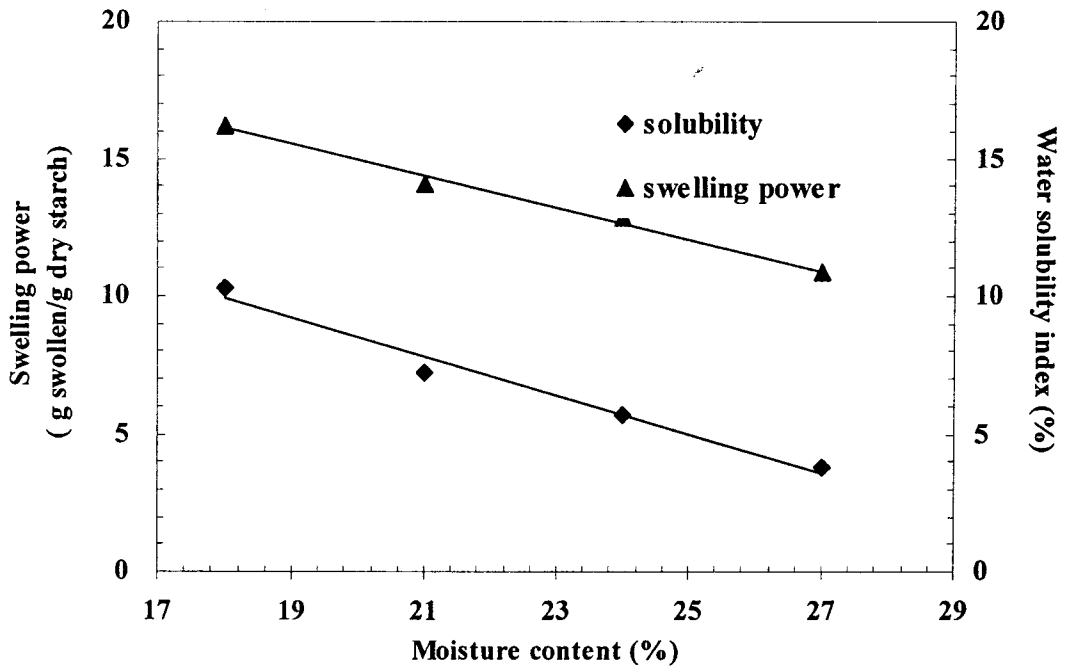


Figure 10. Relationship between swelling power or solubility and moisture content for heat-moisture treated banana starches from Nang paya.

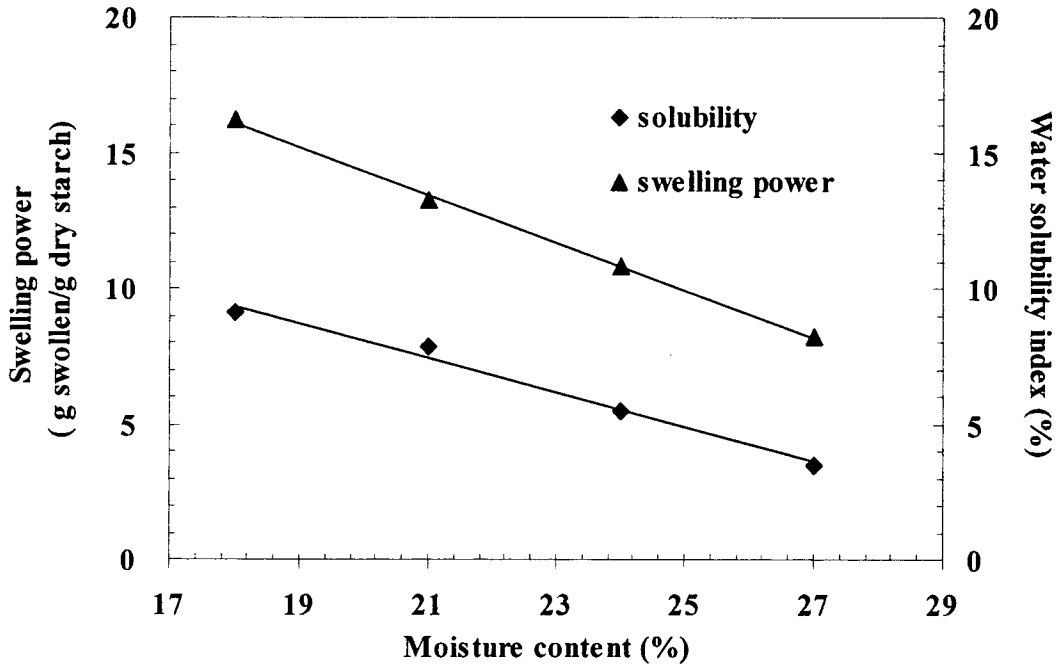


Figure 11. Relationship of swelling power and solubility of heat-moisture treated banana starch from Hin and moisture content of the treatments.

2.2.2 สมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

ศึกษาสมบัติทางความร้อนของสตาร์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Carolimetry (DSC) พบว่าสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินแสดงพีคดูดความร้อน (endotherm) ซึ่งแสดงถึงการใช้พลังงานในการหลอมละลายผลึกของสตาร์ช (Figure 12 และ Figure 13) จากการทดลองสามารถวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลาติไนเซชัน (To) อุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจลาติไนเซชัน (Tp) อุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลาติไนเซชัน (Tc) ช่วงของอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน (Tc-To) และพลังงานในการเกิดเจลาติไนเซชัน (ΔH) แสดงดัง Table 8 พบว่าสตาร์ชกล้วยนางพญาก่อนการดัดแปรมีค่า To เท่ากับ 72.70 °C ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า To ของสตาร์ชกล้วยหักมุก (70.96°C) สตาร์ช กล้วยน้ำว้าค่อม (71.97°C) สตาร์ชกล้วยตานี (71.67°C) (วสันต์ ศิริวงศ์, 2003) และสตาร์ชกล้วย Square (*Musa balbisiana*) (71.60°C) (Torre-Gutierrez *et al.*, 2007) สำหรับสตาร์ชกล้วยหินก่อนการดัดแปร พบว่ามีค่า To เท่ากับ 68.36 °C ซึ่งมีค่าต่ำกว่าของสตาร์ชกล้วยนางพญา แสดงถึงความแข็งแรงของโครงสร้างที่น้อยกว่า จากการดัดแปรสตาร์ชกล้วยนางพญาด้วยวิธีความร้อนชื้น พบว่าค่า To ของสตาร์ชกล้วยทั้งสองสายพันธุ์ภายหลังการดัดแปรมีค่าสูงกว่าของสตาร์ชกล้วยก่อนการดัดแปร และเมื่อระดับความร้อนชื้นที่ใช้ในการดัดแปรเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ค่า To มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (R^2 =0.97, $p< 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง

การดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยวิธีความร้อนชื้น (ปาริดา ขุนแอ, 2008) Lim และคณะ (2001) รายงานว่าการเพิ่มขึ้นของค่า To ของสตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงของสายกิ่งอะมิโลเพคติน บริเวณที่ก้ำกึ่งระหว่างผลึกและอสัณฐาน (intercrystalline amorphous parts) ส่งผลให้สายโมเลกุลของอะมิโลเพคตินบริเวณนี้สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระและมีโอกาสเกิดอันตรกิริยากับสายโมเลกุลของอะมิโลสในบริเวณอสัณฐานได้มากขึ้น ทำให้โครงสร้างของสตาร์ชมีความแข็งแรงยิ่งขึ้น จึงส่งผลให้อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมละลายมีค่าสูงขึ้น เมื่อพิจารณาค่า ΔH พบว่าการดัดแปรสตาร์ชกล้วยทั้งสองสายพันธุ์ด้วยความร้อนชื้นส่งผลให้ ΔH มีค่าลดลง และมีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับความชื้นที่ใช้ในการดัดแปรเพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายได้ว่าสายเกลียวคู่ของ อะมิโลเพคตินที่อยู่ในบริเวณผลึกบางส่วนมีการคลายเกลียวมากขึ้น ดังนั้นพลังงานที่ต้องใช้ในการหลอมละลายผลึกจึงลดลง (Cook and Kidley, 1992; Gunaratne and Hoover, 2002)

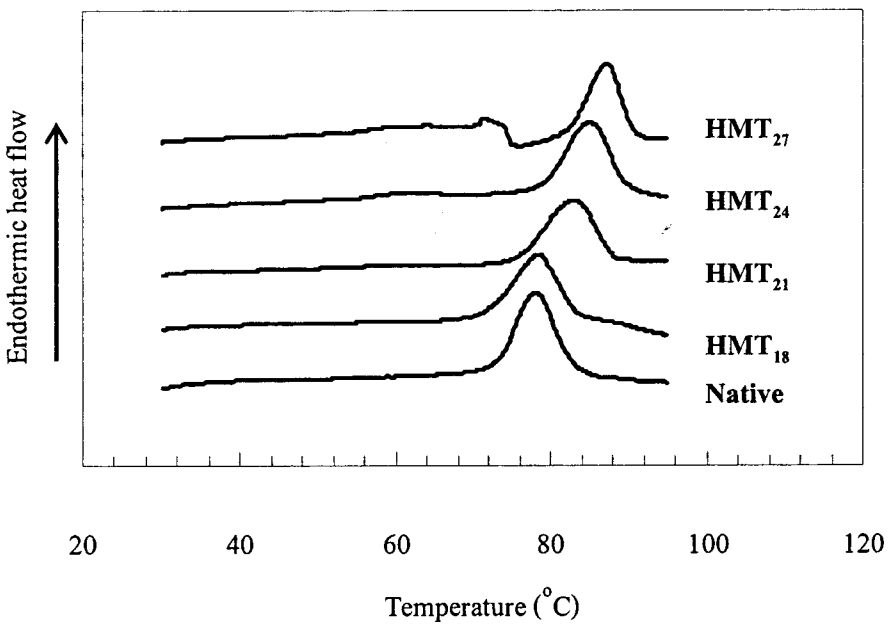


Figure 12. Thermogram of native and heat-moisture treated banana starch from Nang paya at 18% (HMT_{18}), 21% (HMT_{21}), 24% (HMT_{24}) and 27% (HMT_{27}) moisture content.

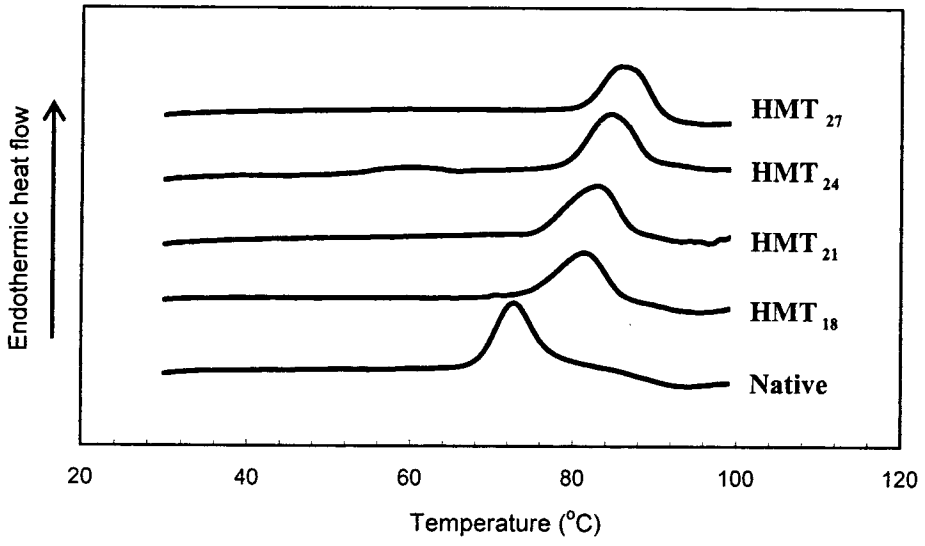


Figure 13. Thermogram of native and heat-moisture treated banana starch from Hin at 18% (HMT_{18}), 21%(HMT_{21}), 24%(HMT_{24}) and 27%(HMT_{27}) moisture content.

Table 8. Gelatinization parameters of native and heat-moisture treated banana starches at 18% (HMT_{18}), 21% (HMT_{21}), 24% (HMT_{24}) and 27% (HMT_{27}) moisture content.

Banana Type	Treatment	Gelatinization temperature (°C)			ΔH
		To	Tp	Tc	(J/g)
Nang paya	Native	$72.70^{d} \pm 0.35$	$77.83^{d} \pm 0.17$	$82.77^{d} \pm 0.22$	$19.27^{a} \pm 0.48$
	HMT_{18}	$71.56^{e} \pm 0.21$	$78.56^{d} \pm 0.10$	$84.14^{c} \pm 0.89$	$16.13^{b} \pm 1.22$
	HMT_{21}	$76.69^{c} \pm 0.82$	$82.44^{c} \pm 1.11$	$87.88^{b} \pm 0.25$	$14.10^{bc} \pm 2.13$
	HMT_{24}	$78.96^{b} \pm 0.08$	$84.94^{b} \pm 0.25$	$89.61^{a} \pm 0.19$	$15.83^{b} \pm 0.35$
	HMT_{27}	$81.86^{a} \pm 0.77$	$87.28^{a} \pm 0.35$	$89.76^{a} \pm 0.77$	$13.16^{c} \pm 1.05$
Hin	Native	$68.63^{e} \pm 0.29$	$73.00^{e} \pm 0.17$	$78.09^{e} \pm 0.24$	$17.68^{a} \pm 0.56$
	HMT_{18}	$74.60^{d} \pm 0.24$	$81.28^{d} \pm 0.42$	$86.22^{d} \pm 0.14$	$15.27^{b} \pm 0.64$
	HMT_{21}	$76.15^{c} \pm 1.67$	$82.90^{c} \pm 0.10$	$87.42^{c} \pm 0.31$	$14.60^{b} \pm 1.80$
	HMT_{24}	$79.10^{b} \pm 0.14$	$84.50^{b} \pm 0.00$	$89.52^{b} \pm 0.15$	$13.99^{c} \pm 0.23$
	HMT_{27}	$81.01^{a} \pm 0.15$	$86.33^{a} \pm 0.17$	$91.24^{a} \pm 0.18$	$13.64^{c} \pm 1.19$

Note: Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in the column for each banana starch denote the significant differences.

2.3 ผลของการดัดแปรสตาร์ชกล้วยนางพญาและกล้วยหินต่อสมบัติทางรีโอโลยี (Rheology properties)

2.3.1 สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชเพสท์ (Pasting properties)

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชกล้วยด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการประเมินและติดตามสมบัติทางความหนืดในขณะที่สารละลายได้รับความร้อนรวมไปถึงความคงตัวของสารละลายสตาร์ชในช่วงการลดอุณหภูมิ จากการศึกษาสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินทั้งก่อนและหลังการดัดแปรในสภาวะที่เป็นกลาง (พีเอช 7.0) มีรูปแบบความหนืด (pasting profile) แสดงดัง Figure 14 และ Figure 15 ซึ่งเมื่อแบ่งรูปแบบความหนืดของสตาร์ชตามวิธีของ Schoch และ Mayward (1968) พบว่าสตาร์ช จากกล้วยนางพญาและกล้วยหินก่อนการดัดแปรมีรูปแบบความหนืดแบบ b คือ ลักษณะกราฟความหนืดที่มีความสูงชันและเกิดการสลายตัวของเม็ดสตาร์ชระหว่างการให้ความร้อนในระดับปานกลาง และเมื่อทำการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นส่งผลให้รูปแบบความหนืดของสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองสายพันธุ์เปลี่ยนแปลงเป็นแบบ c คือลักษณะกราฟไม่ปรากฏยอดสูงสุด (peak) และค่าความหนืดเพิ่มขึ้นระหว่างการให้ความร้อน สำหรับค่าพารามิเตอร์ทางความหนืดของสตาร์ชกล้วยนางพญาก่อนการดัดแปรแสดงดัง Table 9 พบว่าอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) เท่ากับ 79.02 °C ในขณะที่ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) และค่า breakdown เท่ากับ 4370.67 mPa.s และ 1253.67 mPa.s ตามลำดับ สำหรับค่าพารามิเตอร์ทางความหนืดของสตาร์ชกล้วยหินก่อนการดัดแปร (Table 9) พบว่าอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) เท่ากับ 76.20 °C ซึ่งมีค่าต่ำกว่าของสตาร์ชกล้วยนางพญา ในขณะที่ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) และค่า breakdown เท่ากับ 5592.00 mPa.s และ 2733.00 mPa.s ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าของสตาร์ชกล้วยนางพญา แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของสตาร์ชกล้วยหินมีความแข็งแรงน้อยกว่าของสตาร์ชกล้วยนางพญา

หลังจากทำการดัดแปรสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินด้วยวิธีความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นต่างๆ พบว่าสมบัติทางความหนืดมีลักษณะเปลี่ยนไป โดยอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อระดับความชื้นที่ใช้ในการดัดแปรเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองสายพันธุ์กับความชื้นที่ใช้ในการดัดแปรด้วยสมการเชิงเส้น ($R^2 = 0.97$, $p < 0.05$) แสดงดัง Figure 16 จากการเปลี่ยนแปลงอธิบายได้ว่าการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นทำให้สายโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ชเกิดการเคลื่อนที่และสามารถเกิดอันตรกิริยาขึ้นระหว่างสายอะมิโลสกับสายอะมิโลส (AM-AM) และ/หรือ สายอะมิโลสกับสายอะมิโล -

เพคติน (AM-AMP) ส่งผลให้โครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงขึ้น (Stute, 1992; Hoover and Manuel, 1996b) สอดคล้องกับผลการทดลองการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นของสตาร์ชมันฝรั่ง (Kulp and Lorenze, 1981) สตาร์ชข้าวโพด (Hoover and Manuel, 1996a,b) สตาร์ชข้าวโอ๊ต สตาร์ชถั่ว lentil และสตาร์ชกลอย (Hoover and Vasanthan, 1994) สตาร์ชข้าว (ปาริดา ขุนแอ, 2008) เมื่อพิจารณาค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) พบว่าสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรมีค่าความหนืดสุดท้ายลดลงเมื่อระดับความร้อนชื้นที่ใช้ในการดัดแปรเพิ่ม เนื่องจากความแข็งแรงของเม็ดสตาร์ชเพิ่มมากขึ้นจึงสามารถทนต่อความร้อนได้มากขึ้นและทำให้การแตกตัวของเม็ดสตาร์ชลดลง (Adobewal and Lawel, 2003)

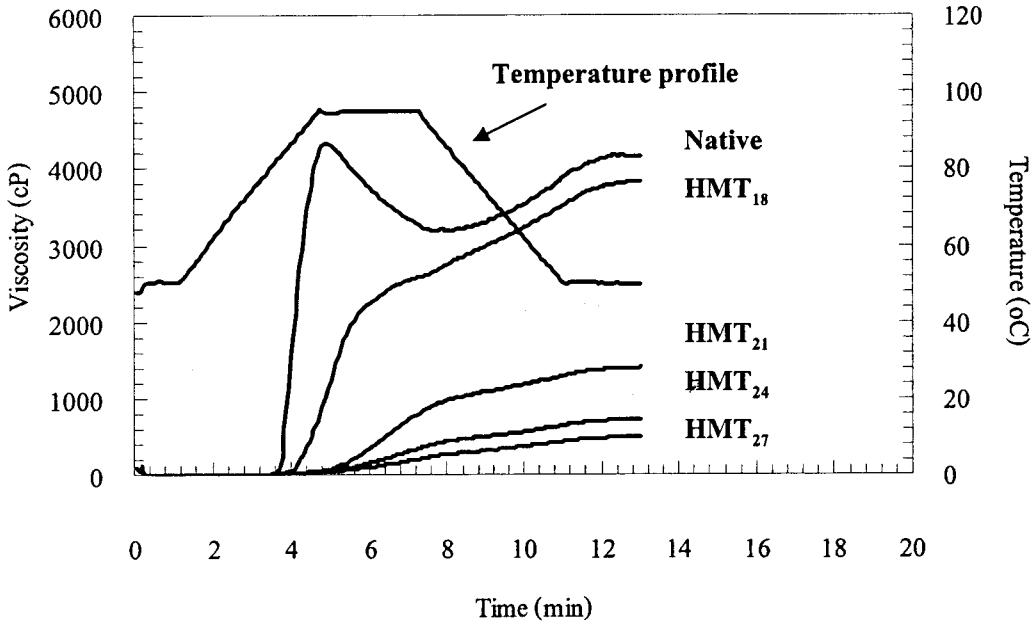


Figure 14. Pasting profile (pH 7.0) of native and heat-moisture treated Nang paya banana starch at 18% (HMT_{18}), 21% (HMT_{21}), 24% (HMT_{24}) and 27% (HMT_{27}) moisture content.

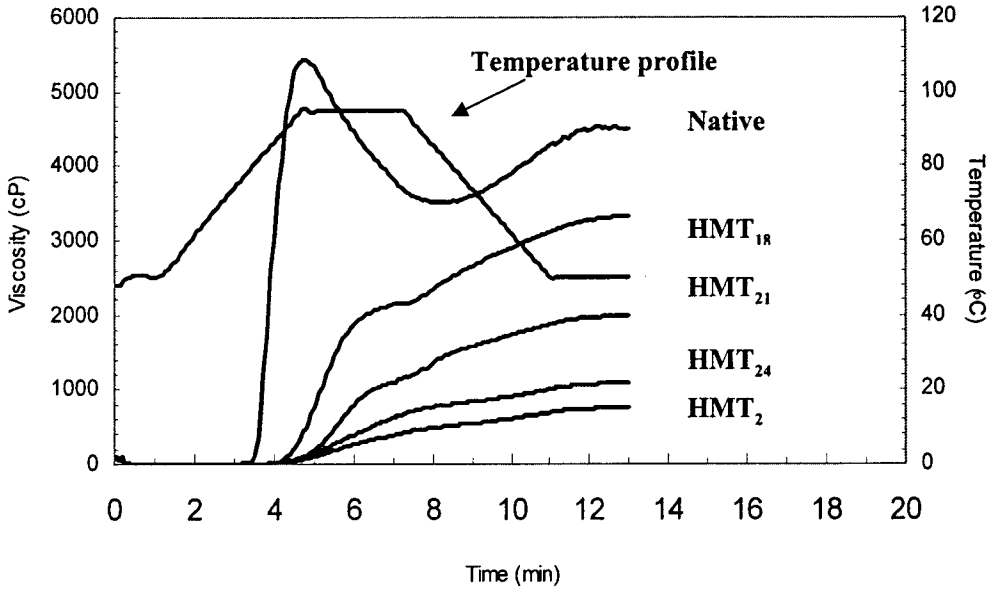


Figure 15. Pasting profile (pH 7.0) of native and heat-moisture treated Hin banana starch at 18% (HMT_{18}), 21% (HMT_{21}), 24% (HMT_{24}) and 27% (HMT_{27}) moisture content.

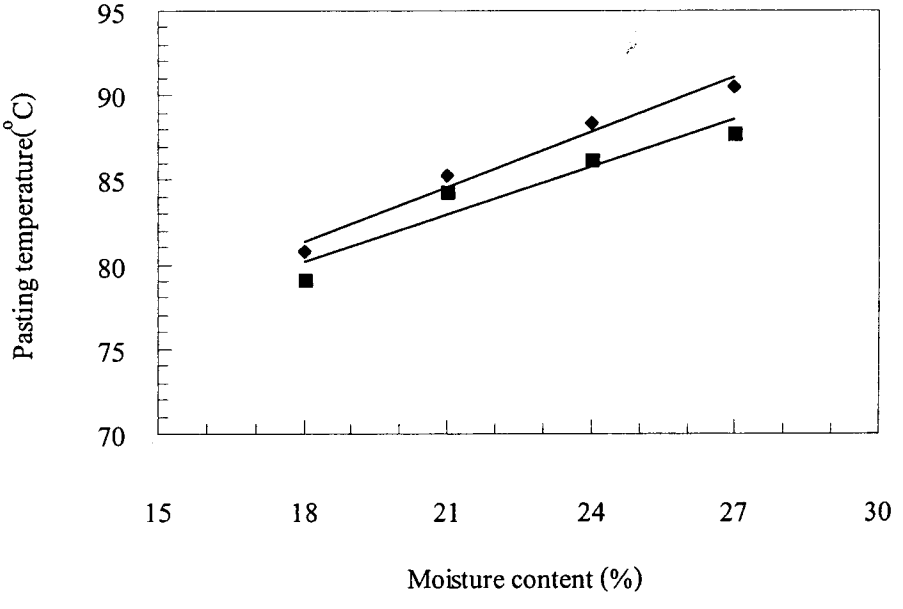


Figure 16. Relationship of pasting temperature at pH 7.0 of heat-moisture treated banana starches from Nang paya (■) and Hin (◆) and moisture content of the treatments.

Table 9. Viscosity parameters from Rapid Visco Analyzer (RVA) of native and heat-moisture treated banana starches from Nang paya and Hin.

Banana type	Treatment	Pasting temperature(°C)	Peak viscosity (mPa.s)	Breakdown (mPa.s)	Setback (mPa.s)	Final viscosity (mPa.s)
Nang paya	Native	79.02^{e} ± 0.58	4370.67±51.19	1253.67±115.30	1033.33^{a}±71.18	4150.33^{b} ± 52.73
	HMT_{18}	80.77^{d} ± 0.40	-	-	-	3887.67^{b} ± 122.28
	HMT_{21}	85.27^{c} ± 0.49	-	-	-	1416.00^{c} ± 41.24
	HMT_{24}	88.33^{b} ± 0.49	-	-	-	707.33^{d} ± 37.58
	HMT_{27}	90.50^{a} ± 0.00	-	-	-	497.67^{e} ± 14.50
Hin	Native	76.20^{e} ± 0.43	5402.67±30.11	1928.33±14.74	1009.67±15.57	4484.00^{a} ± 18.25
	HMT_{18}	82.42^{d} ± 0.49	-	-	-	3320.67^{b} ± 50.64
	HMT_{21}	83.78^{c} ± 0.46	-	-	-	1988.00^{c} ± 17.35
	HMT_{24}	87.15^{b} ± 0.00	-	-	-	1032.00^{d} ± 104.85
	HMT_{27}	88.33^{a} ± 0.49	-	-	-	747.67^{e} ± 11.24

Note: Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in the column for each banana starch denote the significant differences ($p<0.05$)

2.3.2 พฤติกรรมการไหล (Flow behavior)

ศึกษาพฤติกรรมการไหลของสตาร์ชกล้วยทั้งก่อนและหลังการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้น โดยเตรียมสตาร์ชเพสต์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 4 (โดยน้ำหนักแห้ง) ทำการวัดที่อุณหภูมิ 60°C ในช่วงอัตราการเฉือนเท่ากับ 30-300 s^{-1} จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือนของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหิน พบว่าเป็นไปตามกฎสมการยกกำลัง (power law) ดังสมการที่ 1 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในระดับสูง ($R^2 = 0.99$, $p < 0.05$)

$$\sigma = k\dot{\gamma}^n \qquad (1)$$

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

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความหนืดปรากฏและอัตราการเฉือนของ สตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินก่อนการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้น พบว่าความหนืดปรากฏมีค่าลดลงเมื่ออัตราการเฉือนเพิ่มขึ้น (Figure 17) เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว (k)พบว่าสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินมีค่า k เท่ากับ 2.69 $Pa.s^n$ และ 3.68 $Pa.s^n$ ตามลำดับ และมีค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล (n) ที่เท่ากันคือเท่ากับ 0.53 แสดงดัง Table 10 ซึ่งแสดงว่าสตาร์ชเพสต์จากกล้วยทั้งสองสายพันธุ์มีพฤติกรรมการไหลแบบ shear-thinning (pseudoplastic) (Doublier, 1981; Noel *et al.*, 1993) เมื่อทำการดัดแปรสตาร์ชกล้วยนางพญาด้วยความร้อนชื้นพบว่าค่าความหนืดปรากฏและค่า k ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) และพบว่าสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นมีค่า n เพิ่มสูงขึ้นโดยมีค่าใกล้เคียงกับ 1 (Table 7) ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการไหลแบบ Newtonian ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อสตาร์ชผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น ส่งผลให้โครงสร้างของเม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้น ความสามารถในการพองตัวน้อยลงส่งผลให้ความหนืดมีค่าลดต่ำลง

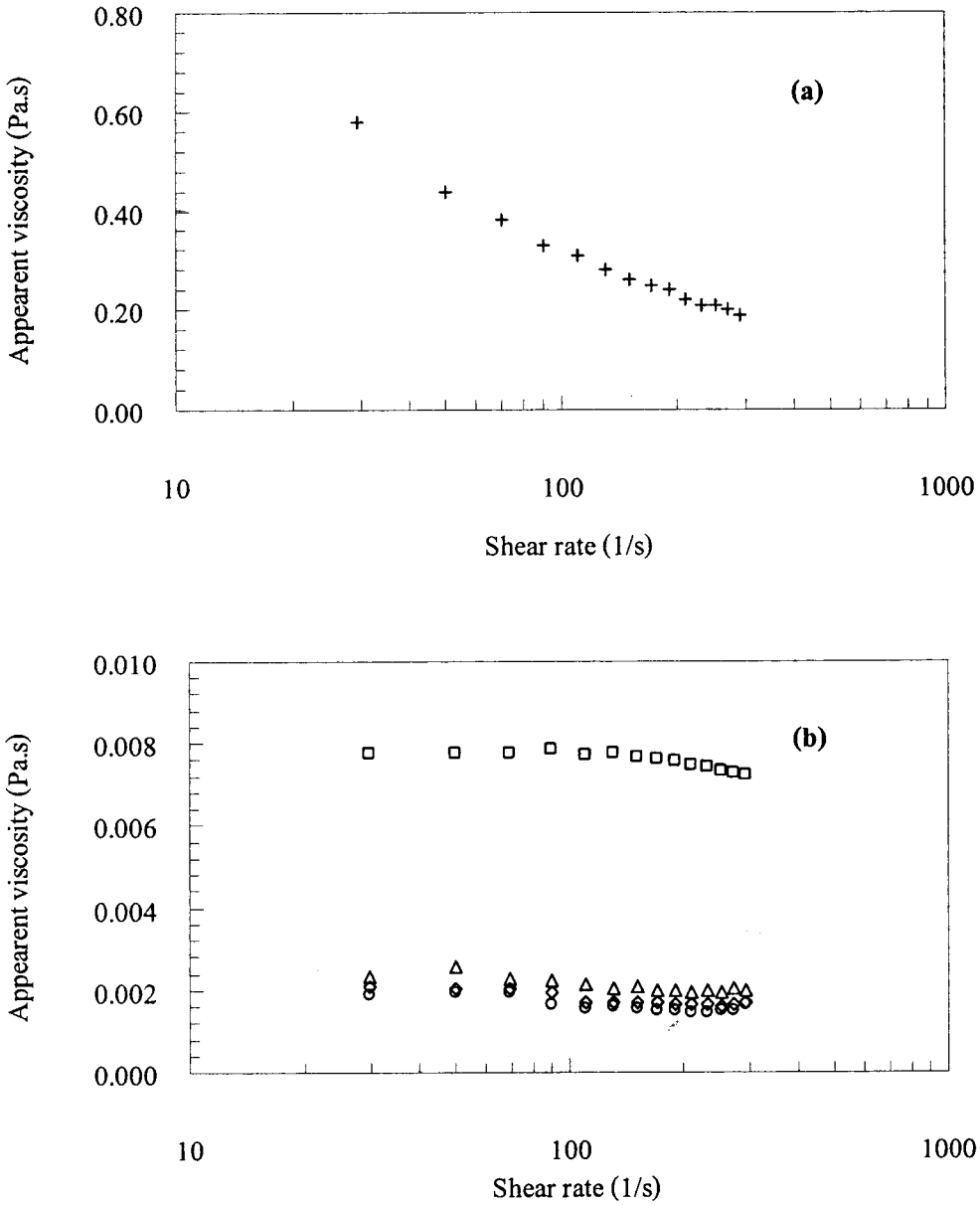


Figure 17. Relationship between apparent viscosity and shear rate for (a) native and (b) heat-moisture treated banana starches at 18%(□), 21%(△), 24%(○) and 27%(◇) moisture contents. Banana starches were obtained from Nang paya.

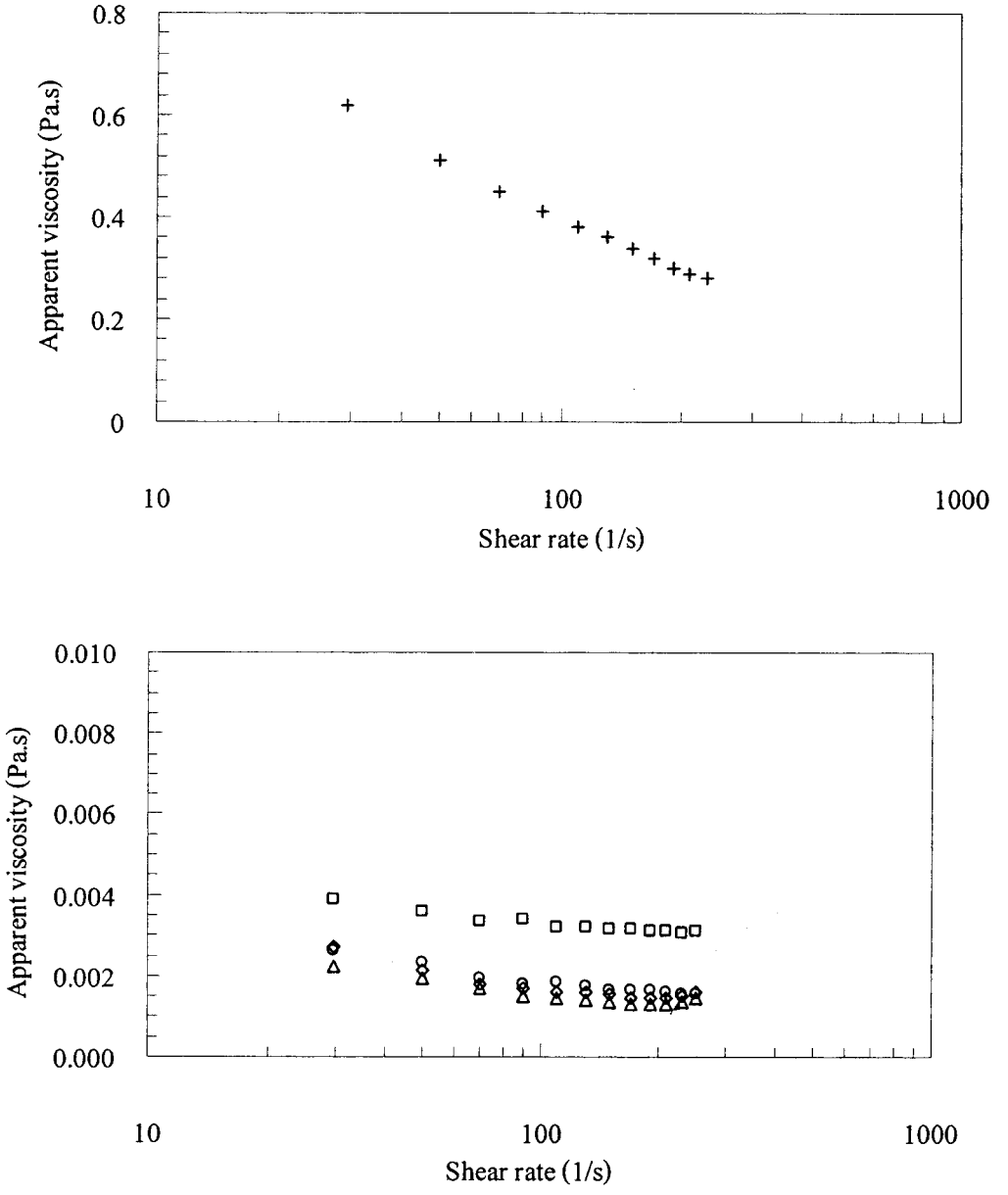


Figure 18 Relationship between apparent viscosity and shear rate of (a) native and (b) heat-moisture treated banana starches at 18%(□), 21%(△), 24%(○) and 27%(◇) moisture contents.Bnana starches were obtained from Hin.

Table 10. Consistency coefficient (k) and flow behavior index (n) of native and heat-moisture treated banana starches from Nang paya and Hin.

Treatment	Nang paya		Hin	
	k ($Pa.s^n$)	n	k ($Pa.s^n$)	n
Native	$2.690^a \pm 0.141$	$0.533^c \pm 0.010$	$3.681^a \pm 0.401$	$0.531^d \pm 0.013$
HMT_{18}	$0.010^b \pm 0.001$	$0.944^b \pm 0.009$	$0.005^b \pm 0.000$	$0.937^b \pm 0.005$
HMT_{21}	$0.003^b \pm 0.001$	$0.901^b \pm 0.011$	$0.004^b \pm 0.000$	$0.922^b \pm 0.004$
HMT_{24}	$0.002^b \pm 0.001$	$0.961^b \pm 0.022$	$0.003^b \pm 0.001$	$0.873^c \pm 0.026$
HMT_{27}	$0.001^b \pm 0.001$	$1.067^a \pm 0.157$	$0.001^b \pm 0.000$	$1.118^a \pm 0.056$

Note: Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in the column for each banana starch denote the significant differences.

2.3.3 สมบัติวิสโคอิลาสติก (Viscoelastic properties)

การวิเคราะห์สมบัติวิสโคอิลาสติกแบบการสั่นทางพลวัติ (dynamic oscillation) เป็นการวิเคราะห์การตอบสนองต่อความเค้น (stress) หรือความเครียด (strain) ภายใต้การเคลื่อนที่แบบสั่นของวัสดุวิสโคอิลาสติก โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ storage modulus (G'), loss modulus (G") และ loss tangent (tan δ) ซึ่งค่า G' หมายถึงปริมาณพลังงานที่ถูกเก็บไว้ในวัสดุเมื่อได้รับความเค้นหรือความเครียด ค่า G" หมายถึงพลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากความหนืด และค่า tan δ หมายถึงสัดส่วนของการแสดงสถานการณ์เป็นวัสดุไหลหนืดต่อวัสดุยืดหยุ่น (G"/G') โดยการวิเคราะห์สมบัติวิสโคอิลาสติกนี้เป็นการศึกษา frequency sweep test ของสตาร์ชเพสท์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 8 (โดยน้ำหนักแห้ง) ที่อุณหภูมิ 25 °C โดยทำการทดลองในช่วง linear viscoelastic

จากการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของสมบัติวิสโคอิลาสติก พบว่าสตาร์ชจากกล้วยสองสายพันธุ์ทั้งก่อนและหลังการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น มีค่า G' สูงกว่าค่า G" แสดงดัง Figure 18 ซึ่งเป็นคุณลักษณะของเจล (Biliaderis *et al.*, 1992) นอกจากนั้นพบว่าค่า G' มีการเปลี่ยนแปลงกับค่าความถี่น้อยมาก ซึ่งแสดงถึงคุณลักษณะที่เทียบเคียงกับเจลที่แท้จริง (true gel) (Clark and Ross-Murphy, 1987) เมื่อพิจารณาค่า G' ที่ความถี่ 1 Hz แสดงดัง Table 11 พบว่าค่า G' ของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินก่อนการดัดแปรมีค่าเท่ากับ 294.44 Pa และ 371.71 Pa เมื่อทำการดัดแปรสตาร์ชกล้วยนางพญาด้วยวิธีความร้อนชื้น พบว่า G' มีค่าเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น ($R^2 = 0.99$, $p < 0.05$) เมื่อปริมาณความชื้นที่ใช้ในการดัดแปรเพิ่มขึ้นแสดงดัง Figure 19 โดยที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 พบว่าสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินมีค่า G' เท่ากับ 3386.70 Pa และ 2354.00 Paตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นส่งผลให้เจลของสตาร์ชกล้วยนางพญามีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการดัดแปร

สตาร์ชข้าวหอมมะลิ และสตาร์ชข้าวเฉี้ยงด้วยวิธีความร้อนชื้น (ปาริดา ขุนแอ, 2008) ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าอาจเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยากันระหว่างสายโมเลกุลของสายอะมิโลสกับอะมิโลส (AM-AM) และ/หรือ สายอะมิโลสกับสายอะมิโลเพคติน(AM-AMP) ซึ่งเป็นอันตรกริยาภายในเม็ดสตาร์ชที่เกิดขึ้นระหว่างการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้น ซึ่งอันตรกริยาของโครงร่างตาข่ายเหล่านี้ ในเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) มีความสำคัญต่อความแข็งแรงของเจล (Hoover and Manuel, 1996a,b)

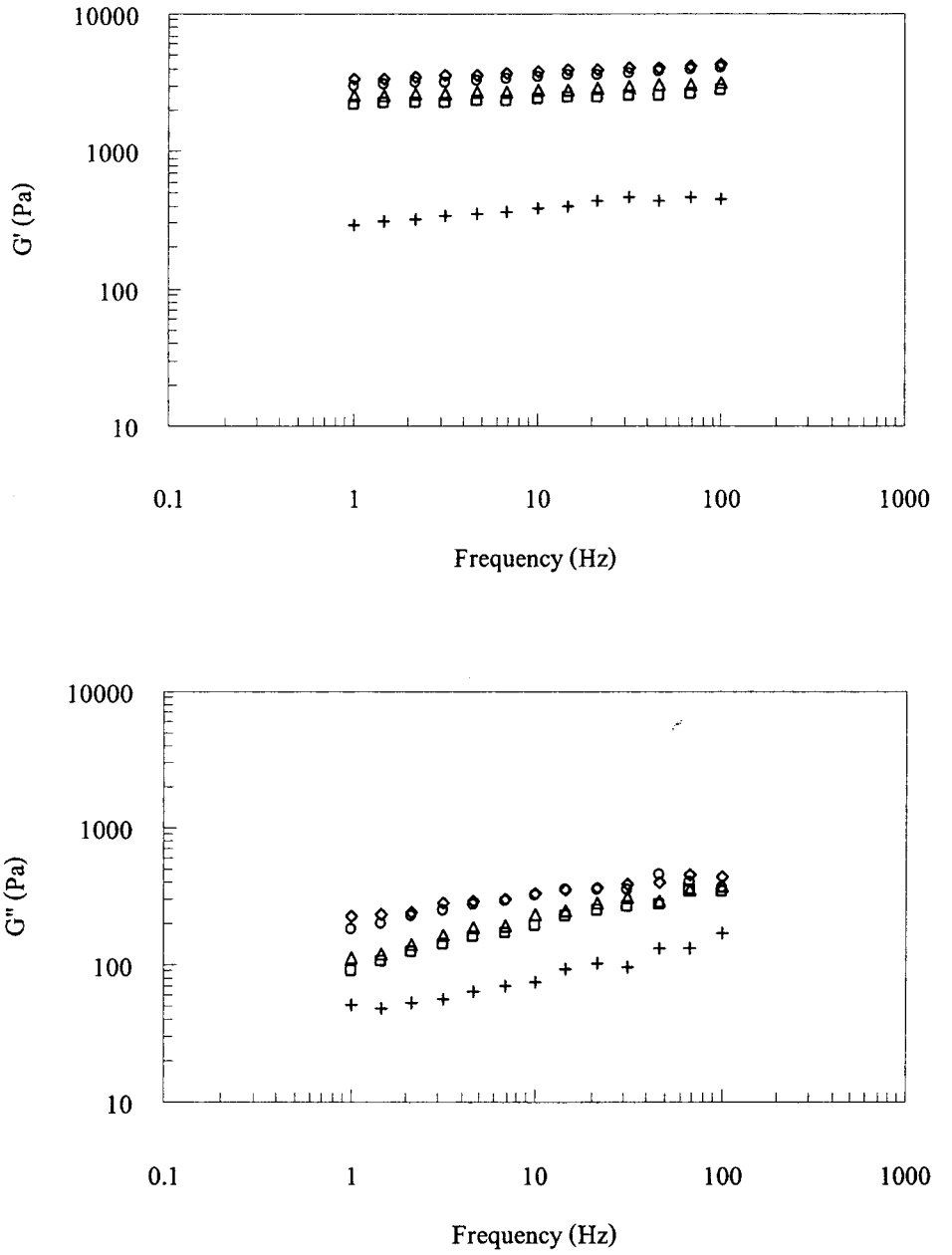


Figure 19. Effect of frequency on G' and G" for native (+) and heat-moisture treated Nang paya banana starch (8% concentration) at 18% (□), 21% (△), 24% (○) and 27% (◇) moisture content. All samples were measured at 25°C..

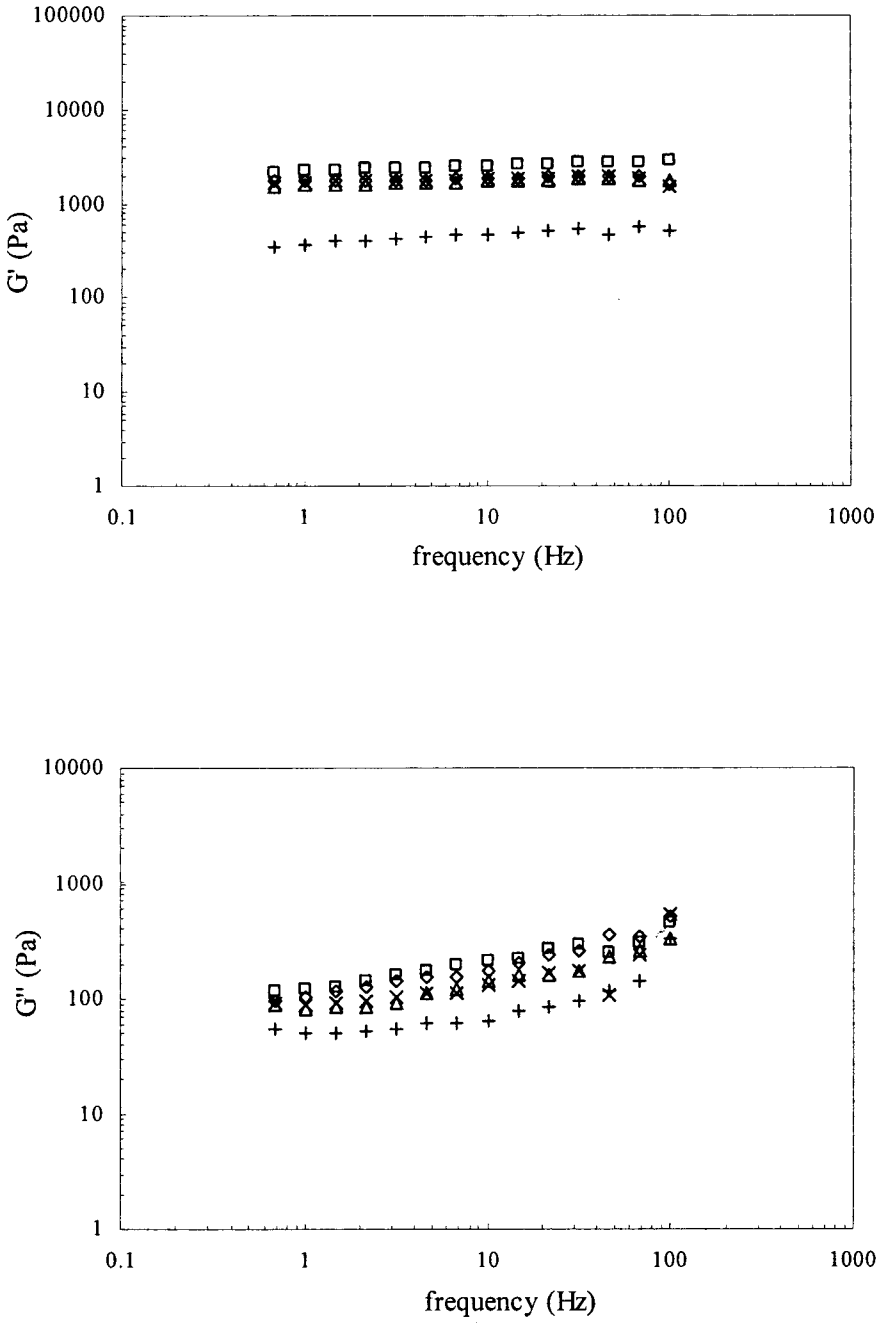


Figure 20. Effect of frequency on G' and G" for native (+) and heat-moisture treated Hin banana starch (8% concentration) at 18% (□), 21% (△), 24% (x) and 27% (◇) moisture content. All samples were measured at 25°C.

Table 11. Viscoelastic parameters of native and heat-moisture treated banana starches from Nang paya and Hin at paste concentration of 8% (w/w) and measurement at 1 Hz.

Banana type	Treatment	G' (Pa)	G" (Pa)	tan δ
Nang paya	Native	$294.44^{e} \pm 24.47$	$50.24^{e} \pm 1.15$	$0.172^{a} \pm 0.017$
	HMT_{18}	$2152.48^{d} \pm 63.30$	$88.20^{d} \pm 2.48$	$0.041^{d} \pm 0.001$
	HMT_{21}	$2529.35^{c} \pm 42.98$	$112.50^{c} \pm 0.75$	$0.044^{d} \pm 0.001$
	HMT_{24}	$3009.00^{b} \pm 119.96$	$182.65^{b} \pm 6.27$	$0.061^{c} \pm 0.001$
	HMT_{27}	$3386.70^{a} \pm 178.68$	$241.70^{a} \pm 10.02$	$0.072^{c} \pm 0.002$
Hin	Native	$371.71^{d} \pm 49.95$	$52.06^{d} \pm 3.11$	$0.140^{a} \pm 0.007$
	HMT_{18}	$1564.12^{c} \pm 390.56$	$194.96^{a} \pm 73.09$	$0.059^{b} \pm 0.032$
	HMT_{21}	$1680.14^{c} \pm 223.97$	$107.51^{b} \pm 24.54$	$0.058^{b} \pm 0.014$
	HMT_{24}	$1826.46^{b} \pm 233.31$	$92.52b^{c} \pm 7.64$	$0.056^{b} \pm 0.001$
	HMT_{27}	$2354.00^{a} \pm 117.52$	$120.48^{b} \pm 8.84$	$0.051^{b} \pm 0.002$

Note: Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in the column for each banana starch denote the significant differences ($p < 0.05$).

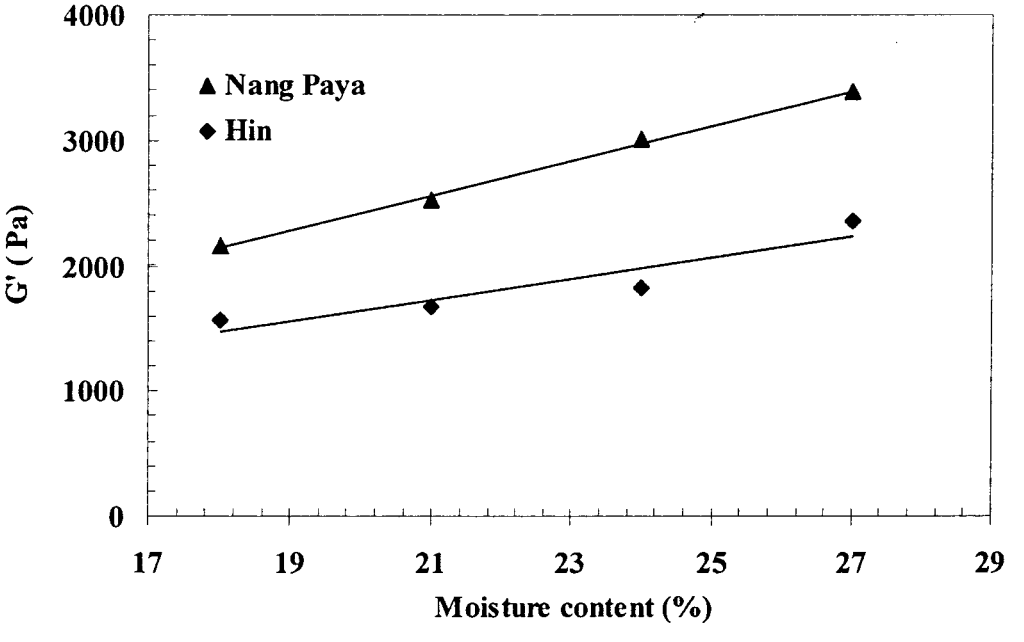


Figure 21. Relationship of G' value of heat-moisture treated banana starches and moisture content of the treatments.

2.3.4 การวิเคราะห์ความคืบ (Creep study)

ศึกษาการคืบ (creep compliance) และการคืนตัวจากการคืบ (creep recovery) ของเจลสตาร์ชทั้งก่อนและหลังการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นด้วยเครื่องรีโอโลยี จากการศึกษาความสัมพันธ์ของค่า compliance กับเวลาในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้แบบจำลอง Burger model พบว่าการเปลี่ยนแปลงการคืบของเจลสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินก่อนการดัดแปรมีความล้ายคลึงกัน โดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วง (Sherman, 1970) แสดงดัง Figure 22 และ Figure 23 คือช่วง ideal elastic ซึ่งแสดงค่า instantaneous elastic modulus (G_0) บ่งบอกถึงการที่พันธะภายในของเจลสตาร์ชมีการยืดตัวอย่างยืดหยุ่น ถ้าเอาแรงเฉือนออกสามารถเกิดการคืนตัว (recovery) ได้อย่างสมบูรณ์ ช่วง viscoelastic ซึ่งแสดงค่า retarded elastic modulus (G_1), retarded viscosity (η_1) และ retard time (τ_1) ช่วงนี้เป็นช่วงที่พันธะของวัสดุมีการแตกออกและคืนรูป (reform) โดยพันธะทั้งหมดไม่ได้แตกออกและคืนรูปที่อัตราเดียวกัน และช่วง viscosity แสดงค่า terminal viscosity (η_n) เป็นช่วงที่พันธะของวัสดุเกิดการแตกออกและไม่สามารถคืนรูปได้ จึงทำให้วัสดุเกิดการไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian) ภายหลังการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นต่างๆ พบว่าเจลสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินแสดงการเปลี่ยนแปลงการคืบเฉพาะช่วง ideal elastic เท่านั้น ซึ่งแสดงถึงการที่พันธะภายในโครงสร้างของเจลสตาร์ชมีการยืดตัวอย่างยืดหยุ่น ดังเช่นวัสดุยืดหยุ่นในอุดมคติ (ideal elastic material)

จากการวิเคราะห์พารามิเตอร์การเปลี่ยนแปลงการคืบของเจลสตาร์ชด้วยวิธี Inokushi (Shama and Sherman, 1966; Sherman, 1966) แสดงดัง Table 12 พบว่าเจลสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินก่อนการดัดแปร มีค่า G_0 G_1 τ_1 และ η_1 ใกล้เคียงกัน เมื่อทำการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีความร้อนชื้นพบว่าค่า G_0 ของสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองสายพันธุ์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเจลของสตาร์ชกล้วยภายหลังการดัดแปรมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในข้อ 2.3.3 เมื่อเปรียบเทียบผลของระดับความชื้นที่ใช้ในการดัดแปร พบว่าเมื่อระดับความชื้นที่ใช้ในการดัดแปรมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ G_0 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยพบว่าที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 ค่า G_0 ของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินมีค่าเท่ากับ 6837.20 Pa และ 6464.88 Pa ตามลำดับ

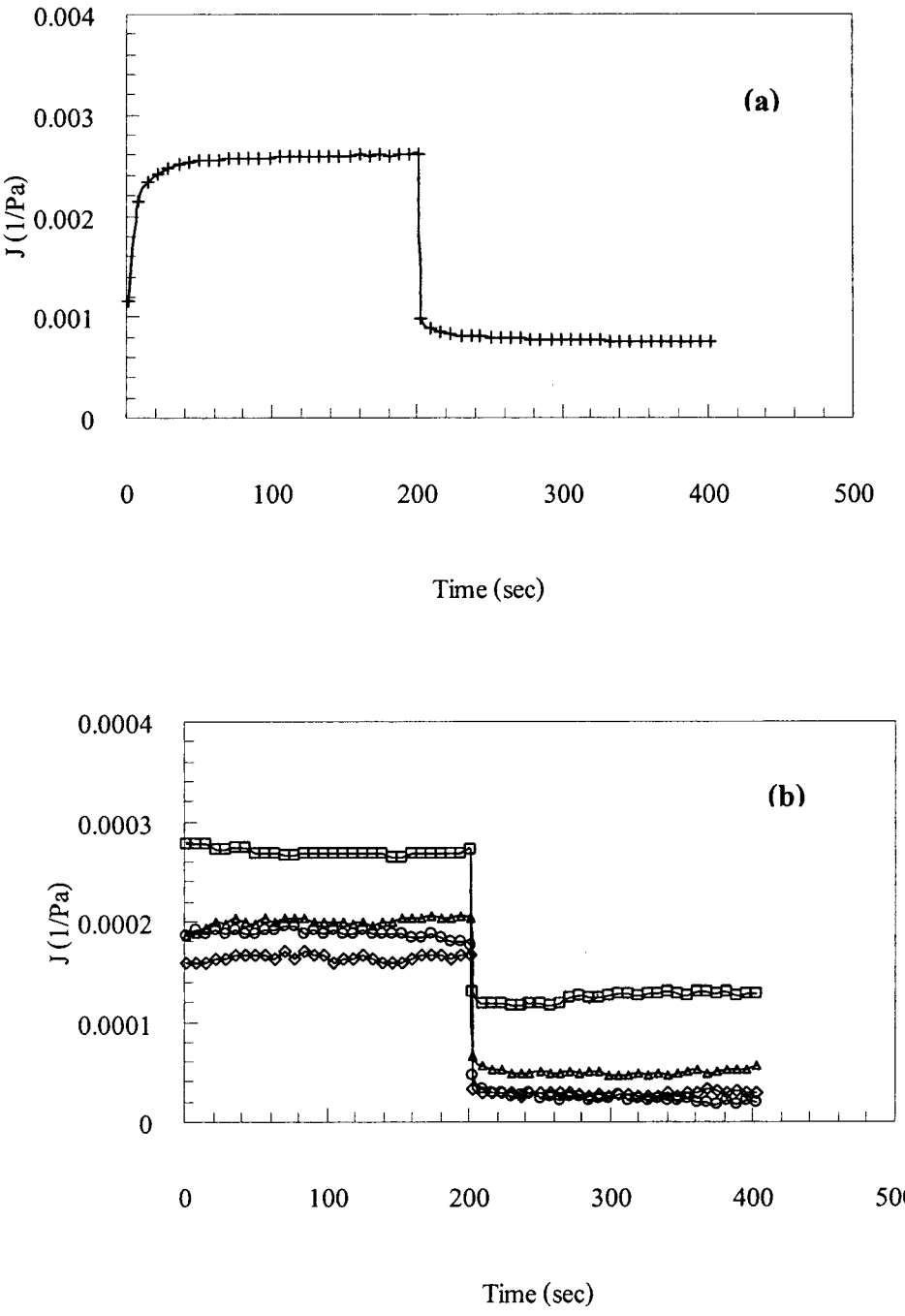


Figure 22. Creep compliance and creep recovery for native (+) and heat-moisture treated Nangpaya banana starch (10 % concentration) at 18% (□), 21%(△), 24%(○) and 27%(◇) moisture content. All samples were measured at 2% strain.

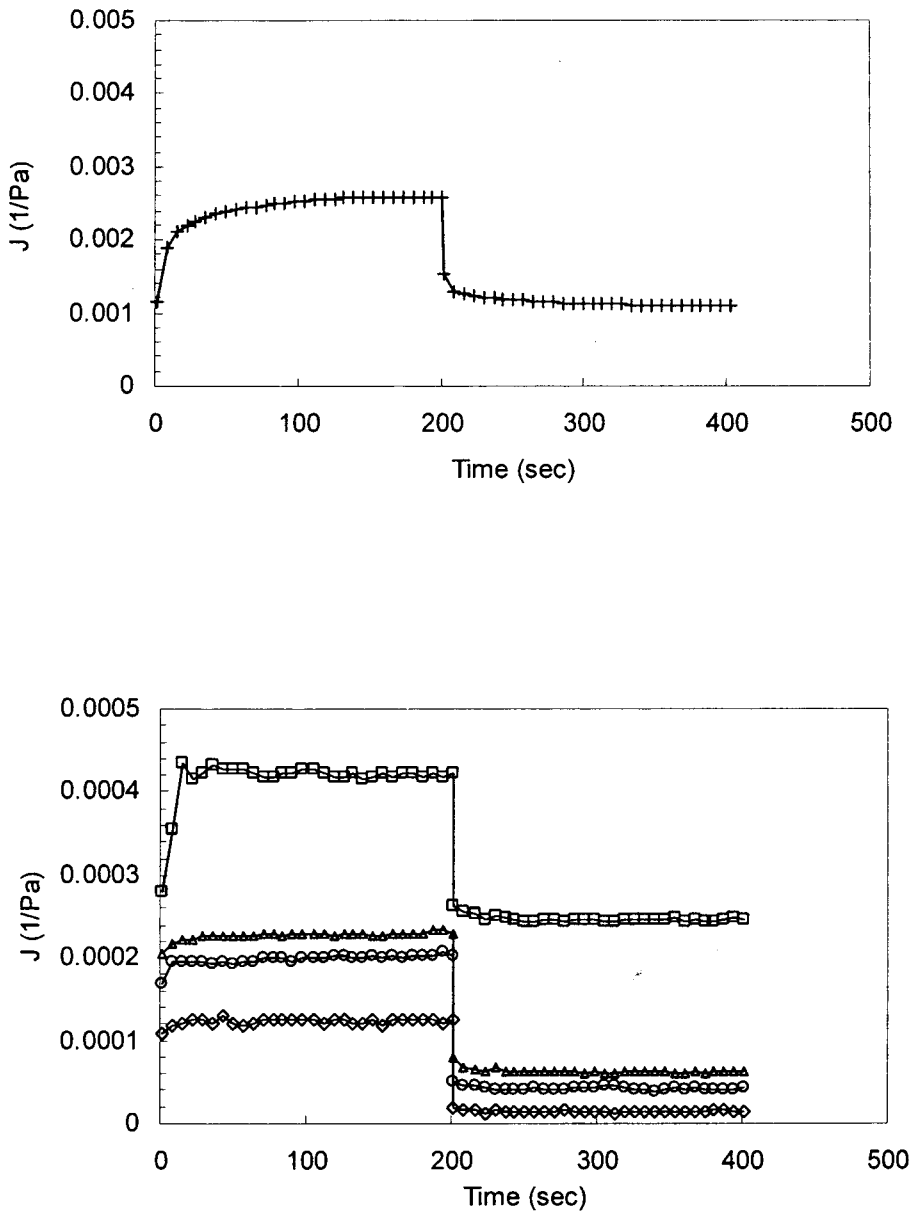


Figure 23. Creep compliance and creep recovery for native (+) and heat-moisture treated Hin banana starch (10 % concentration) at 18% (□), 21%(△), 24%(○) and 27%(◇) moisture content. All samples were measured at 2% strain.

Table 12. Creep parameters of native and heat-moisture treated banana starches at concentration of 10% (w/w).

Banana type	Treatment	Ideal elastic	Viscoelastic			Viscosity
		G_o (Pa)	G_1 (Pa)	τ_1 (sec)	η_1 (Pa.s)	η_n (Pa.s)
Nang paya	Native	$875.95^{d} \pm 14.74$	785.73 ± 5.03	7.62 ± 0.00	$(6.01 \pm 0.00) \times 10^{3}$	$(5.40 \pm 2.84) \times 10^{5}$
	HMT_{18}	$4301.43^{c} \pm 547.27$	-	-	-	-
	HMT_{21}	$5736.98^{b} \pm 780.12$	-	-	-	-
	HMT_{24}	$6377.16^{ab} \pm 219.33$	-	-	-	-
	HMT_{27}	$6837.20^{a} \pm 327.80$	-	-	-	-
Hin	Native	$840.28^{d} \pm 75.44$	1034.53 ± 0.00	14.33 ± 0.00	$(14.82 \pm 0.00) \times 10^{3}$	$(3.67 \pm 0.00) \times 10^{5}$
	HMT_{18}	$3625.03^{c} \pm 578.44$	-	-	-	-
	HMT_{21}	$5630.78^{b} \pm 759.59$	-	-	-	-
	HMT_{24}	$6045.84^{b} \pm 711.49$	-	-	-	-
	HMT_{27}	$8464.88^{a} \pm 644.42$	-	-	-	-

Note: Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in the column for each banana starch denote the significant differences ($p < 0.05$).

2.4 ผลของการดัดแปรสตาร์ชกล้วยต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน

2.4.1 ผลของการดัดแปรสตาร์ชกล้วยนางพญาต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน

ศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectoscopy (FT-IR) ซึ่งเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของปริมาณสายเกลียวคู่ต่ออสัณฐาน โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงพีคการดูดกลืนแสงอินฟาเรดที่วัดการยืด (stretching) ของหมู่ C-C กับ C-O และการงอ (bending) ของหมู่ COH ในช่วงจำนวนคลื่น (wave number) 1300–800 cm^{-1} (Cael *et al.*, 1975) โดยพีคการดูดกลืนแสงที่ 1047 cm^{-1} มีความสัมพันธ์กับปริมาณสายเกลียวคู่หรือปริมาณผลึก และพีคการดูดกลืนแสงที่ 1022 cm^{-1} มีความสัมพันธ์กับส่วนอสัณฐานของสตาร์ช ดังนั้นอัตราส่วนของค่าการดูดกลืนแสงที่ 1047 ต่อ1022 cm^{-1} จึงแสดงถึงสัดส่วนของโมเลกุลที่จัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ต่อส่วนอสัณฐาน (RSA) (van Soet *et al.*, 1995)

จากการศึกษาการเก็บรักษาเจลของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินทั้งก่อนและหลังการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้น ที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 ความเข้มข้นร้อยละ 25 (โดยน้ำหนักแห้ง) โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง พบว่าพีคการดูดกลืนแสงอินฟาเรด (FTIR spectra) ที่ 1047 cm^{-1} ของเจลสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองสายพันธุ์ทั้งก่อนและหลังการดัดแปรมีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่ม ซึ่งแสดงถึงการเกิดปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น แสดงดัง Figure 24 และ Figure 25 เมื่อพิจารณาค่า RSA สัมพัทธ์ของเจลสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินทั้งก่อนและหลังการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 (Table 13 และ Table 14) พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่า RSA สัมพัทธ์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลาการเก็บรักษา 26 ชั่วโมงแรก ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากสายโมเลกุลอะมิโลส ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นสามารถเคลื่อนที่เข้ามาจัดเรียงตัวกันใหม่ได้ง่ายโดยเหนี่ยวนำให้เกิดเป็นโครงสร้างสามมิติของเจลสตาร์ช (Goodfellow and Wilson, 1990; van Soet, 1994; Hoover, 2001) จากนั้นเป็นช่วงที่ค่า RSA สัมพัทธ์เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเข้าสู่สมดุล เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษามากกว่า 50 ชั่วโมงซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวของสายโมเลกุลอะมิโลเพคตินซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านจำนวนมาก การเปลี่ยนแปลงในช่วงนี้จะช่วยให้เกิดการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างผลึกที่สมบูรณ์ขึ้น (Goodfellow and Wilson, 1990; van Soet, 1994; Hoover, 2001) การศึกษาเปรียบเทียบค่า RSA สัมพัทธ์ของเจลสตาร์ชกล้วยที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปร พบว่าค่า RSA สัมพัทธ์ของเจลสตาร์ช กล้วยทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการดัดแปรมีค่าสูงกว่าของสตาร์ชกล้วยก่อนการดัดแปรตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นส่งเสริมการเกิดอันตรกริยาระหว่างสายโมเลกุลของอะมิโลส/สายโมเลกุลของอะมิโลเพคตินได้มากขึ้น (Perera and Hoover, 1999; Chuenkamol et al., 2007 and Lawal, 2009)

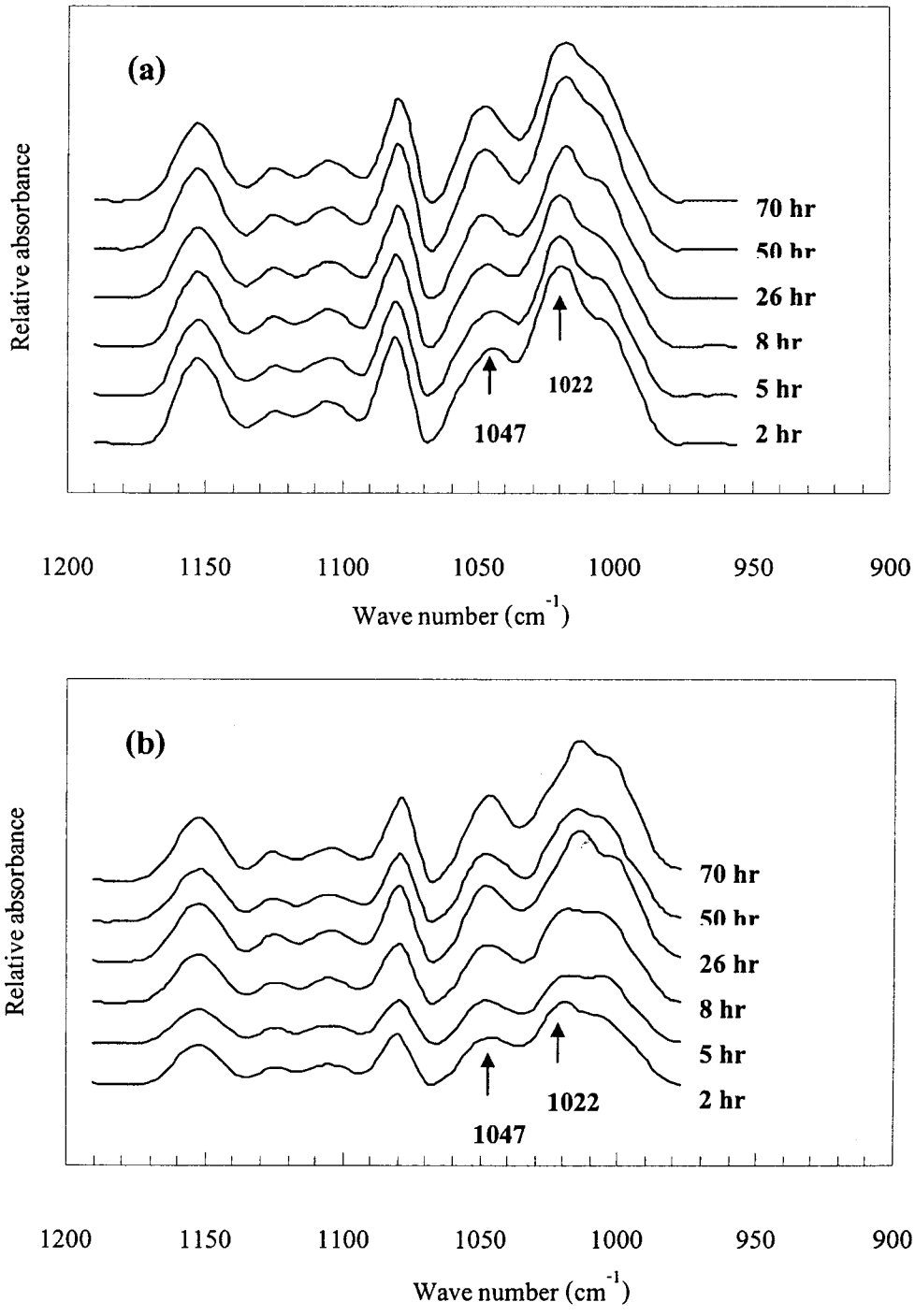


Figure 24. FTIR spectra at various storage times for (a) native and (b) heat-moisture treated at 27% moisture content of Nang paya banana starch gel.

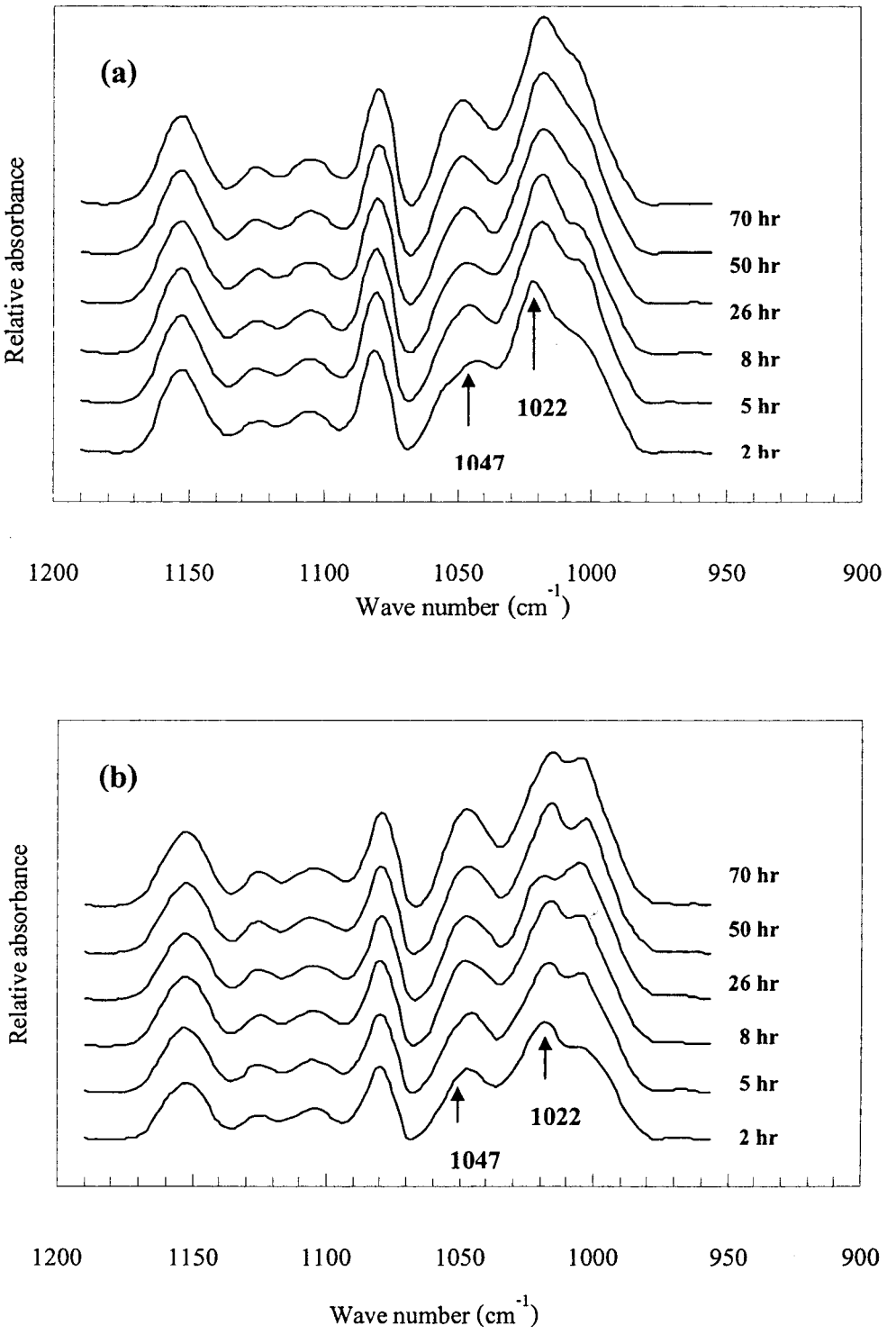


Figure 25. FTIR spectra at various storage times for (a) native and (b) heat-moisture treated at 27% moisture content of Hin banana starch gel.

Table 13. Ratio of short-range molecular order to amorphous (RSA) and relative RSA at various storage times of native and heat-moisture treated at 27% moisture content of banana starch from Nang Paya.

Storage time (hr)	RSA		Relative RSA (%)	
	Native	HMT_{27}	Native	HMT_{27}
2 hr	$0.53^{e} \pm 0.03$	$0.67^{d} \pm 0.01$	65.52	75.18
5 hr	$0.55^{d} \pm 0.03$	$0.69^{c} \pm 0.02$	68.26	85.20
8 hr	$0.57^{c} \pm 0.01$	$0.70^{c} \pm 0.03$	70.30	86.62
26 hr	$0.61^{b} \pm 0.00$	$0.72^{b} \pm 0.04$	75.37	89.48
50 hr	$0.65^{a} \pm 0.00$	$0.74^{a} \pm 0.01$	80.10	92.06
70 hr	$0.65^{a} \pm 0.00$	$0.75^{a} \pm 0.01$	80.09	96.64

Note: Each value is mean of triplicate $\pm$ SD. The different superscripts in each column denote the significant differences ($p < 0.05$).

Table 14. Ratio of short-range molecular order to amorphous (RSA) and relative RSA at various storage times of native and heat-moisture treated at 27% moisture content of banana starch from Hin.

Storage time (hr)	RSA		Relative RSA (%)	
	Native	HMT_{27}	Native	HMT_{27}
2 hr	$0.51^{d} \pm 0.02$	$0.69^{b} \pm 0.01$	63.66	86.85
5 hr	$0.55^{c} \pm 0.03$	$0.70^{b} \pm 0.00$	68.41	88.55
8 hr	$0.56^{c} \pm 0.02$	$0.71^{ab} \pm 0.01$	69.84	88.81
26 hr	$0.60^{b} \pm 0.00$	$0.72^{ab} \pm 0.00$	75.42	90.35
50 hr	$0.62^{a} \pm 0.02$	$0.73^{a} \pm 0.03$	77.71	91.13
70 hr	$0.63^{a} \pm 0.02$	$0.73^{a} \pm 0.01$	78.98	91.70

Note: Each value is mean of triplicate $\pm$ SD. The different superscripts in each column denote the significant differences ($p < 0.05$).

2.5 ผลของการดัดแปรสตาร์ชกล้วยนางพญาต่อความสามารถในการย่อย (degree of hydrolysis)

2.5.1 ความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ (enzyme hydrolysis)

จากการศึกษาความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชโดยใช้เอนไซม์ porcine pancreatic *alpha*–amylase พบว่ารูปแบบการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินทั้งก่อนและหลังการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้น แสดงดัง Figure 26 และFigure 27 โดยพบว่าความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน (two-stage pattern) โดยช่วงแรกสตาร์ช กล้วยนางพญาถูกย่อยด้วยเอนไซม์อย่างรวดเร็วภายในเวลา 24 ชั่วโมงแรก จากนั้นการย่อยเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จนเข้าสู่สมดุล นอกจากนั้นพบว่าสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการดัดแปรมีค่าระดับการถูกย่อยด้วยเอนไซม์สูงกว่าของสตาร์ชก่อนการดัดแปร ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นของสตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชมันฝรั่ง (Kulp and Lorenz, 1981) สตาร์ชถั่ว สตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันแกว (Hoover *et al.*, 1993; Hoover and Vasanthan, 1994) นอกจากนั้นพบว่าเมื่อระดับความชื้นที่ใช้ในการดัดแปรเพิ่มขึ้น ค่าระดับการถูกย่อยด้วยเอนไซม์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ระดับการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการดัดแปรที่มีค่าสูงขึ้นนี้ สามารถอธิบายได้ว่าอาจเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้างผลึกของสตาร์ชกล้วยนางพญาจากรูปแบบ B เป็นรูปแบบ A+B ภายหลังการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้น (ดังหัวข้อ 2.1.2) ซึ่ง Jane และคณะ(1997)ได้รายงานว่าโครงสร้างผลึกรูปแบบ A (A-type crystalline) มีความไวต่อการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ได้มากกว่าโครงสร้างผลึกรูปแบบ B (B-type crystalline) เนื่องจากโครงสร้างผลึกรูปแบบ A มีอะมิโลเพคตินสาย A (A-chain) มากกว่าโครงสร้างผลึกรูปแบบ B ซึ่งอะมิโลเพคตินสาย A นี้สามารถเกิดอันตรกิริยากันเป็นสายโมเลกุลเกลียวคู่สายสั้นๆ (short double helices) และสามารถเชื่อมต่อกับอะมิโลเพคตินสาย B เกิดเป็นโครงสร้างแบบกิ่ง (branch point) ในบริเวณส่วนที่เป็นผลึก (crystalline region) มากกว่าโครงสร้างผลึกรูปแบบ B เป็นผลให้โครงสร้างของสตาร์ชมีความแข็งแรงลดลงจึงสามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์ได้มากขึ้น Hoover and Manuel (1996) ได้รายงานว่าความเข้มข้นของเอนไซม์อะมิเลสภายในเม็ดสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นมีค่าสูงกว่าของสตาร์ชก่อนการดัดแปร ทั้งนี้เนื่องจากเอนไซม์อะมิเลสสามารถแพร่ผ่านผิวหน้าของเม็ดสตาร์ชที่ถูกดัดแปรด้วยความร้อนชื้นได้มากกว่า จึงส่งผลให้สตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรสามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์ได้มากกว่า อย่างไรก็ตามความแตกต่างของความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชอาจมีผลมาจากปัจจัยต่างๆ ดังนี้ ขนาดของเม็ดสตาร์ช (granular size) พื้นที่ผิวของเม็ดสตาร์ช (surface area) อัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพคติน ปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสกับไขมัน ปริมาณผลึกและการกระจายตัวของตำแหน่งการเชื่อมต่อของพันธะ alpha (1-6) ระหว่างบริเวณที่เป็นอสัณฐานและบริเวณที่เป็นผลึกของอะมิโลเพคติน (Holm *et al.*, 1983; Hoover and Sosulski, 1991; Jane *et al.*, 1997; Planchot *et al.*, 1997)

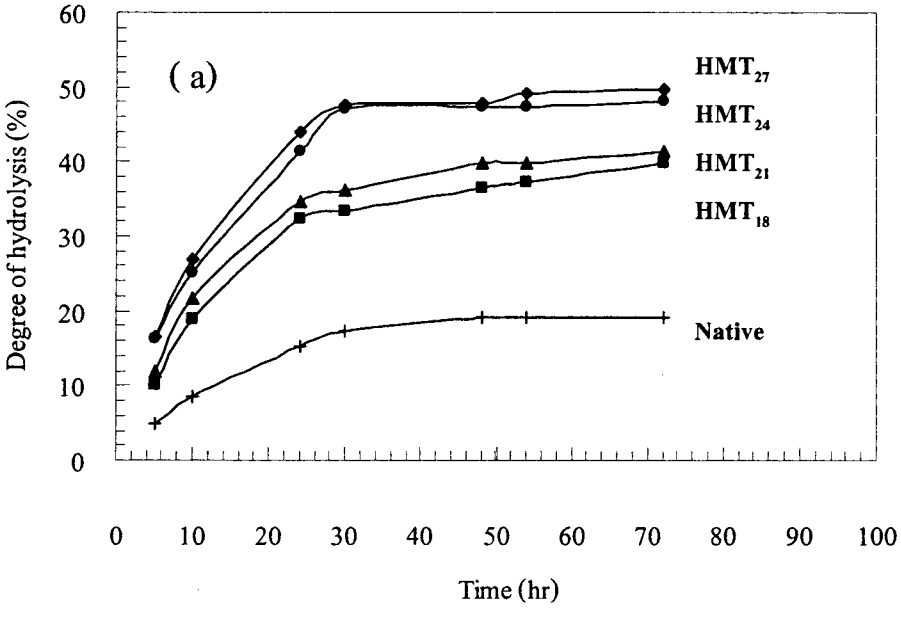


Figure 26. Enzyme hydrolysis of native (+) and heat-moisture treated Nang paya banana starch at 18% (■), 21% (▲), 24% (●) and 27% (◆) moisture content.

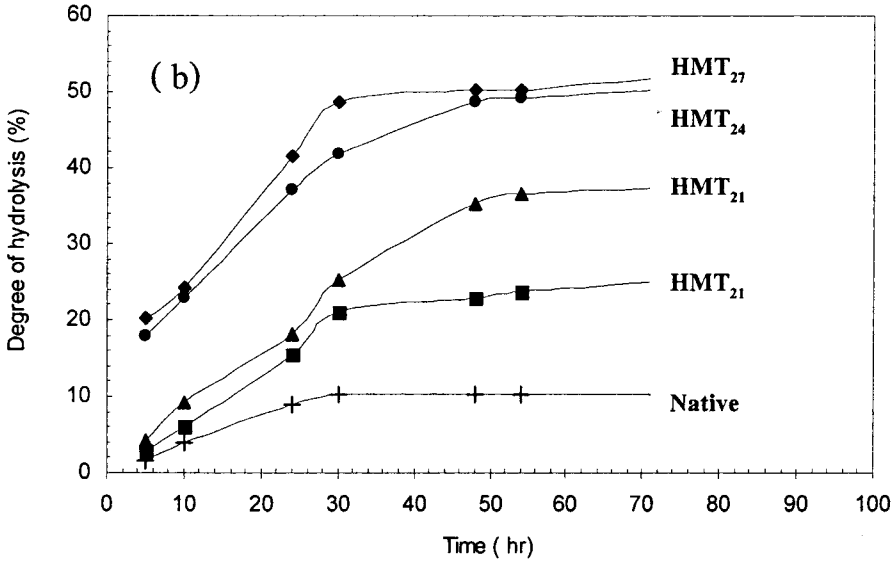


Figure 27. Enzyme hydrolysis of native (+) and heat-moisture treated banana starch from Nangpaya (a) and Hin (b). Banana starches were modified by heat-moisture treatment at 18% (■), 21% (▲), 24% (●) and 27% (◆) moisture content.

2.5.2 ความสามารถในการถูกย่อยด้วยกรด (acid hydrolysis)

จากการศึกษาความสามารถในการถูกย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริกของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหิน พบว่ารูปแบบการถูกย่อยด้วยกรดของสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองสายพันธุ์ทั้งก่อนและหลังการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นเป็นแบบ 2 ขั้นตอน (two-stage pattern) เช่นเดียวกับรูปแบบการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ แสดงดัง Figure 28 และ Figure 29 โดยพบว่าระดับการถูกย่อยด้วยกรดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเวลา 12 วันแรก จากนั้นการย่อยเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จนเข้าสู่สมดุล ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าระดับการถูกย่อยที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกเป็นผลเนื่องจากการทำงานของกรดในบริเวณโครงสร้างส่วนอสัณฐาน (amorphous region) ซึ่งอยู่ใกล้กับบริเวณผิวหน้าของเม็ดสตาร์ช จากนั้นกรดจึงเข้าไปย่อยในบริเวณส่วนที่เป็นผลึก (crystalline region) ซึ่งเป็นส่วนที่มีความแข็งแรง โดยการย่อยเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จนเข้าสู่สมดุล (Kainuma and French,1971; Cairna *et al.*, 1990) นอกจากนั้นพบว่าสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินภายหลังการดัดแปรมีระดับการถูกย่อยด้วยกรดสูงกว่าของสตาร์ชก่อนการดัดแปร และเมื่อระดับความชื้นที่ใช้ในการดัดแปรมีค่าเพิ่มขึ้น พบว่าระดับการถูกย่อยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นสอดคล้องกับผลการทดลองการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นของสตาร์ชถั่ว (legume starches) (Hoover and Manuel, 1996) สตาร์ชเผือก (Gunaratne and Hoover, 2002) Hoover (2000) ได้รายงานว่าความแตกต่างของความสามารถในการถูกย่อยด้วยกรดของสตาร์ชอาจมีผลมาจากปัจจัยต่างๆ ดังนี้ ขนาดของเม็ดสตาร์ช (granular size) ปริมาณการเกิดอันตรกิริยาของสายโมเลกุลของสตาร์ช ปริมาณโครงสร้างของสายโมเลกุลเกลียวคู่ในบริเวณส่วนที่เป็นอสัณฐาน องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ช อัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพคติน และปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสกับไขมัน

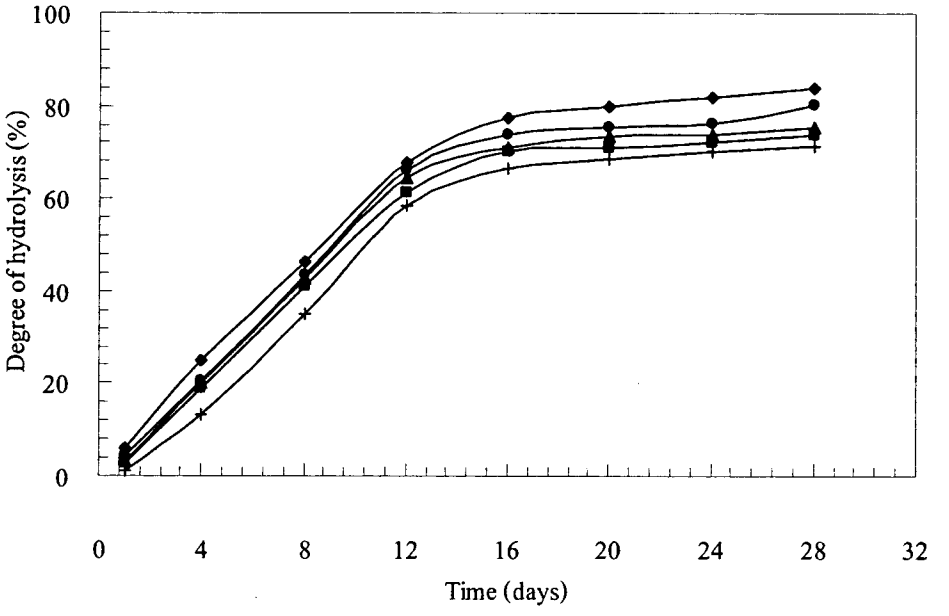


Figure 28. Acid hydrolysis of native(+) and heat-moisture treated Nang paya bananastarch at 18%(■), 21%(▲), 24%(●) and 27%(◆) moisture content.

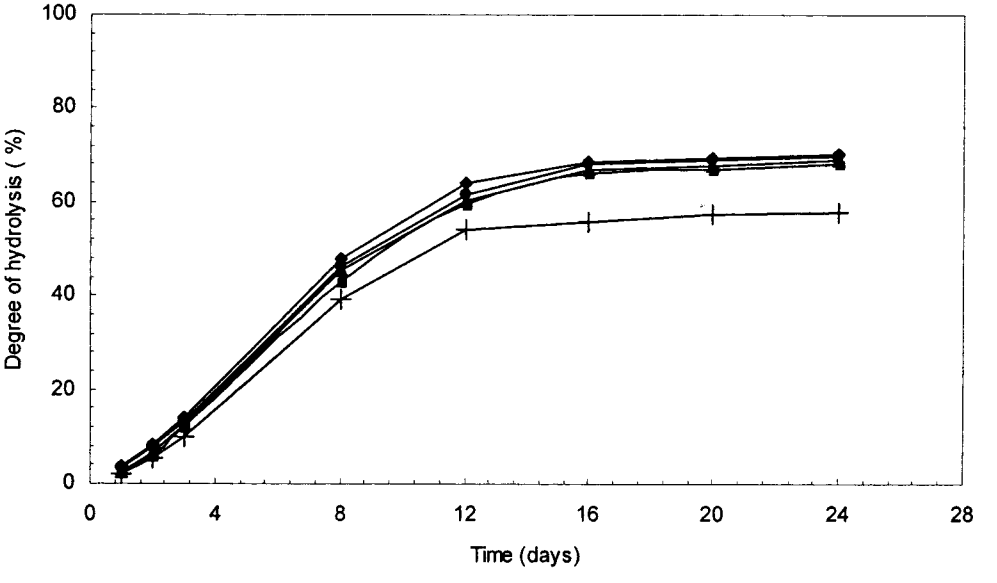


Figure 29. Acid hydrolysis of native(+) and heat-moisture treated Hin banana starch at 18%(■), 21%(▲), 24%(●) and 27%(◆) moisture content.

2.6 ผลของการดัดแปรสตาร์ชกล้วยต่อปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (resistant starch content)

จากการศึกษาปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชก่อนการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้น พบว่าปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชกล้วยหิน(ร้อยละ 70.52) มีค่าสูงกว่าของสตาร์ชกล้วยนางพญา (ร้อยละ 60.16) โดยซึ่งมีค่าต่ำกว่าของสตาร์ช กล้วยสายพันธุ์ Musa acuminatar var. Nandigobe (ร้อยละ 95.1) แต่มีค่าใกล้เคียงกับสตาร์ชมันฝรั่ง (ร้อยละ 66.50) และสตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสสูง(amylomaize) (ร้อยละ 71.40) (Champ *et al.*, 2002; Lehmann *et al.*, 2002) สตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ที่พบในสตาร์ชกล้วยจัดเป็นสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ประเภทที่ 2 (RS type 2) คือสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ (native resistant starch granules) เนื่องจากสตาร์ชกล้วยมีขนาดของเม็ดสตาร์ชใหญ่ มีชั้นผิวนอกของเม็ดแกรนูลที่หนา ทำให้เม็ดแป้งไม่มีรูหรือช่องเปิดให้เอนไซม์เข้าไปในเม็ดแป้ง จึงทำให้ขัดขวางและป้องกันการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ได้ดี (Zhang *et al.*, 2005) เมื่อทำการดัดแปรสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองสายพันธุ์ด้วยวิธีความร้อนชื้น พบว่าปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แสดงดัง Table 15 และพบว่าเมื่อระดับความชื้นที่ใช้ในการดัดแปรมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์มีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตามพบว่าถึงแม้ว่าปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นมีค่าค่อนข้างต่ำ แต่ก็ยังคงจัดอยู่ในกลุ่มของสตาร์ชที่มีปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ในระดับสูงมาก (very high) คือมากกว่าร้อยละ 15 (Goni *et al.*, 1996) ซึ่งยังคงมีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพ

Table 15. Resistant starch content of native and heat-moisture treated banana starches.

Treatment	Resistant starch (% db)	
	Nang paya	Hin
Native	$60.16^{a} \pm 0.28$	$70.52^{a} \pm 0.19$
HMT_{18}	$57.87^{b} \pm 0.43$	$62.00^{b} \pm 0.09$
HMT_{21}	$54.07^{c} \pm 0.50$	$59.44^{c} \pm 0.09$
HMT_{24}	$42.25^{d} \pm 0.84$	$42.47^{d} \pm 0.38$
HMT_{27}	$34.00^{e} \pm 0.84$	$34.67^{e} \pm 0.47$

Note: Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in the column for each banana starch denote the significant differences.

ตอนที่ 3 การดัดแปรสตาร์ชกล้วยด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชัน (hydroxypropylated)

3.1 ผลของระดับความเข้มข้นของโพรพิลีนออกไซด์ต่อค่าการแทนที่โมลาร์ (molar substitution, MS) ของสตาร์ชกล้วย

การผลการศึกษาพบว่าเมื่อระดับความเข้มข้นของสารโพรพิลีนออกไซด์สูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณไฮดรอกซีโพรพิลและค่าระดับการแทนที่โมลาร์ (molar substitution, MS) ของสตาร์ชกล้วยนางพญาและสตาร์ชกล้วยหินมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) แสดงดัง Table 16 ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อระดับความเข้มข้นของสารโพรพิลีนออกไซด์สูงขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณหมู่ไฮดรอกซีโพรพิลที่สามารถเข้าไปแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH)) ภายในโครงสร้างส่วนอสัญฐานของสตาร์ชได้มากขึ้น (Suwanliwong., 1998) สำหรับค่า MS จากผลการทดลองนี้พบว่ามีค่าอยู่ในระดับที่ FDA อนุญาตให้ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร ($MS \leq 0.2$) ผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Lawal (2009) ซึ่งทำการดัดแปรสตาร์ช finger millet ด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชัน โดยพบว่าเมื่อปริมาณสารโพรพิลีนออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 40 มิลลิลิตร ค่า MS เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.05 เป็น 0.16

Table 16. Hydroxypropylene content and molar substation (MS) of modified banana starches hydroxypropylated with propylene oxide of 8%, 10% and 12%.

Banana type	Treatment	Hydroxypropylene content (%)	Molar substation (MS)
Nang paya	HP 8%	$0.979^{c} \pm 0.070$	$0.027^{c} \pm 0.002$
	HP 10%	$1.080^{b} \pm 0.066$	$0.030^{b} \pm 0.002$
	HP 12%	$1.341^{a} \pm 0.095$	$0.037^{a} \pm 0.003$
Hin	HP 8%	$0.833^{c} \pm 0.010$	$0.023^{c} \pm 0.001$
	HP 10%	$1.030^{b} \pm 0.049$	$0.028^{b} \pm 0.001$
	HP 12%	$1.262^{a} \pm 0.048$	$0.035^{a} \pm 0.001$

Note: banana starches hydroxypropylated with propylene oxide of 8% (HP8), 10% (HP10) and 12% (HP12). Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in the column for each banana starch denote the significant differences ($P<0.05$).

3.2 ผลของระดับความเข้มข้นของโพรพิลีนออกไซด์ต่อสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชกล้วย

3.2.1 กำลังการพองตัว ความสามารถการละลาย และความใส (swelling power, solubility and paste clarity)

จาก Table 17 พบว่าค่ากำลังการพองตัว ความสามารถในการละลาย และความใสของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันมีค่าสูงกว่าของสตาร์ชกล้วยก่อนการดัดแปรอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิล (-OH)) ภายในโครงสร้างส่วนอสัญฐานของสตาร์ชถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซีโพรพิลเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงผลักระหว่างสายโมเลกุลของสตาร์ชเพิ่มขึ้น ทำให้เม็ดสตาร์ชสามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้น ค่ากำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายจึงสูงขึ้น (Lawal, 2009; Hung and Morita, 2005; and Waliszewski *et al*, 2003) และการที่เกิดแรงผลักระหว่างสายโมเลกุลของสตาร์ชเพิ่มขึ้นนี้สามารถช่วยป้องกันการเกิดอันตรกริยาระหว่างสายโมเลกุลและภายในสายโมเลกุล (inter and intramolecular interaction) ของสตาร์ชเพสท์ จึงทำให้ค่าความใสของสตาร์ชมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเจลลี่ ไส้กรอก เพสท์ผลไม้ เป็นต้น (Jyothi *et al.*, 2005) นอกจากนั้นพบว่าเมื่อระดับความเข้มข้นของสารโพรพิลีนออกไซด์เพิ่มขึ้นค่ากำลังการพองตัวและความใสของสตาร์ชกล้วยทั้งสองก็มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Liu และคณะ (1999)

Table 17. Swelling power, solubility and paste clarity of native and modified banana starch hydroxypropylated with propylene oxide of 8%, 10% and 12%.

Banana tpye	Treatment	Swelling power (g/g)	Solubility (%)	Paste clarity ($\%T_{650}$)
Nang paya	Native	$25.72^{d} \pm 0.45$	$15.64^{d} \pm 0.88$	$35.0^{d} \pm 0.2$
	HP 8%	$35.40^{c} \pm 0.52$	$21.09^{c} \pm 0.40$	$44.1^{c} \pm 0.2$
	HP 10%	$39.12^{b} \pm 0.32$	$23.18^{b} \pm 0.83$	$48.8^{b} \pm 0.2$
	HP 12%	$41.91^{a} \pm 0.24$	$24.75^{a} \pm 0.56$	$54.8^{a} \pm 0.2$
Hin	Native	$25.13^{d} \pm 0.75$	$17.20^{d} \pm 0.68$	$34.6^{d} \pm 0.2$
	HP 8%	$38.14^{c} \pm 0.43$	$23.03^{c} \pm 0.40$	$43.7^{c} \pm 0.2$
	HP 10%	$42.05^{b} \pm 1.81$	$25.59^{b} \pm 0.83$	$48.2^{b} \pm 0.2$
	HP 12%	$44.18^{a} \pm 0.45$	$26.52^{a} \pm 0.56$	$53.2^{a} \pm 0.2$

Note: banana starches hydroxypropylated with propylene oxide of 8% (HP8), 10% (HP10) and 12% (HP12). Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in the column for each banana starch denote the significant differences ($P<0.05$).

3.1.2 สมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผ่านการดัดแปรร่วมด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันด้วยเครื่อง Differential Scanning Carlorimetry (DSC) พบว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน (To Tp และ Tc) และ ΔH ของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันมีค่าต่ำกว่าของสตาร์ชกล้วยก่อนการดัดแปรอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) แสดงดัง Table 18 เนื่องจากการที่มีหมู่ไฮดรอกซีโพรพิลเข้าไปแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ภายในโครงสร้างส่วนอสัญ- -ฐานของสตาร์ช ซึ่งมีผลให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโมเลกุลของสตาร์ชถูกทำลาย ความแข็งแรงของพันธะภายในโครงสร้างของสตาร์ชจึงลดลง (Perera and Hoover, 1999) และการเกิดการสูญเสียโครงสร้างความเป็นผลึก (Cooke and Gidley, 1992) นอกจากนั้นพบว่าค่า To Tp Tc และ ΔH มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) เมื่อระดับของสารโพรพิลีนออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันขอสตาร์ชมันฝรั่ง (Kaur *et al.*, 2004; Kim and Eliasson, 1993) สตาร์ชข้าว (Seow and Thevamalar, 1993) และสตาร์ชถั่ว (Hoover *et al.*, 1988)

Table 18. Gelatinization parameters of native and modified banana starch hydroxypropylated with propylene oxide of 10% (HP)

Banana type	Treatment	Gelatinization temperature (°C)			ΔH
		To	Tp	Tc	(J/g)
Nang paya	Native	$72.7^{a} \pm 0.3$	$77.8^{a} \pm 0.2$	$82.7^{a} \pm 0.2$	$19.3^{a} \pm 0.5$
	HP 8%	$69.4^{b} \pm 0.2$	$73.7^{b} \pm 0.3$	$79.1^{b} \pm 0.3$	$16.9^{b} \pm 0.4$
	HP 10%	$68.5^{c} \pm 0.1$	$72.8^{c} \pm 0.1$	$78.2^{c} \pm 0.2$	$16.4^{b} \pm 0.7$
	HP 12%	$67.2^{d} \pm 0.3$	$71.5^{d} \pm 0.2$	$76.9^{d} \pm 0.3$	$15.9^{c} \pm 0.3$
Hin	Native	$68.6^{a} \pm 0.3$	$73.0^{a} \pm 0.2$	$78.1^{a} \pm 0.2$	$16.2^{a} \pm 0.6$
	HP 8%	$67.3^{b} \pm 0.3$	$72.0^{b} \pm 0.3$	$77.9^{b} \pm 0.3$	$16.0^{b} \pm 0.5$
	HP 10%	$66.6^{c} \pm 0.1$	$71.3^{c} \pm 0.3$	$77.2^{c} \pm 0.4$	$15.9^{b} \pm 0.8$
	HP 12%	$65.2^{d} \pm 0.3$	$69.9^{d} \pm 0.3$	$75.8^{d} \pm 0.3$	$14.8^{c} \pm 0.4$

Note: banana starches hydroxypropylated with propylene oxide of 8% (HP8), 10% (HP10) and 12% (HP12). Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in the column for each banana starch denote the significant differences ($P<0.05$).

3.2 ผลของการดัดแปรสตาร์ชกล้วยต่อสมบัติทางรีโอโลยี (Rheology properties)

3.2.1 สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชเพสต์ (Pasting properties)

จากผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดความหนืด (pasting temperature) ค่าความหนืดสุดท้าย และค่า setback ของสตาร์ชจากกล้วยหินและกล้วยนางพญามีค่าลดลงหลังผ่านการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชัน ขณะที่ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) และค่า breakdown มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชกล้วยก่อนการดัดแปร แสดงดัง Table 19 นอกจากนั้นเมื่อระดับความเข้มข้นของสารโพรพิลีนออกไซด์เพิ่มขึ้นในช่วงร้อยละ 8 - 12 พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดความหนืดมีค่าลดลง 1–5 °C ขณะที่ค่าความหนืดสูงสุดและค่า breakdown มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 2–12 และร้อยละ 1-23 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชกล้วยก่อนการดัดแปร สำหรับสตาร์ชทั้งจากกล้วยนางพญาและกล้วยหิน ทั้งนี้เนื่องจาการแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซีโพรพิลในเม็ดสตาร์ช ทำให้ความแข็งแรงของพันธะในเม็ดสตาร์ชลดลง ทั้งนี้หมู่ไฮดรอกซีโพรพิลเป็นหมู่ที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ทำให้สามารถดูดซับน้ำเข้าไปในโมเลกุลของสตาร์ชได้มากขึ้น กำลังการพองตัวจึงมีค่าเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ความหนืดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย (Seow and Thevamalar, 1993; Chuenkamol et al., 2007 and Lawal, 2009) นอกจากนั้นพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารโพรพิลีนออกไซด์เพิ่มขึ้นในช่วงร้อยละ8 – 12 ค่าความหนืดสุดท้ายและค่า setback ของสตาร์ชดัดแปรจากกล้วยทั้งสองชนิดมีค่าลดลงร้อยละ 26-45 และ ร้อยละ 31-58 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชกล้วยก่อนการดัดแปร ทั้งนี้เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซีโพรพิลที่เข้าไปแทนที่ในโมเลกุลของสตาร์ชสามารถช่วยป้องกันการเกิดอันตรกริยาระหว่างสายโมเลกุลของอะมิโลสได้ (Perera and Hoover, 1999; Chuenkamol et al., 2007 and Lawal, 2009)) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาสตาร์ชจากข้าวโพด ข้าวสาลี มันฝรั่ง และสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชัน (Shi and Bemiller, 2000 Gunaratne and Corke, 2007)

Table 19. Viscosity parameters from Rapid Visco Analyzer (RVA) of native and modified banana starch hydroxypropylated with propylene oxide of 10% (HP) at 6% (w/w).

Banana type	Treatment	Pasting temperature (°C)	Peak viscosity (mPa.s)	Breakdown (mPa.s)	Final viscosity (mPa.s)	Setback (mPa.s)
Nang paya	Native	$79.02^{a} \pm 0.58$	$4370.67^{d} \pm 51.19$	$1253.67^{d} \pm 115.30$	$4150.33^{a} \pm 52.73$	$1033.33^{a} \pm 71.18$
	HP 8%	$77.30^{b} \pm 0.58$	$4440.67^{c} \pm 20.60$	$1304.00^{c} \pm 48.08$	$3054.50^{b} \pm 20.51$	$709.00^{b} \pm 9.90$
	HP 10%	$76.40^{c} \pm 0.52$	$4659.50^{b} \pm 78.49$	$1346.00^{b} \pm 18.66$	$2677.67^{c} \pm 46.31$	$583.00^{c} \pm 30.05$
	HP 12%	$74.80^{d} \pm 0.52$	$4957.33^{a} \pm 45.08$	$1498.00^{a} \pm 44.51$	$2302.67^{d} \pm 15.31$	$443.33^{d} \pm 15.50$
Hin	Native	$76.20^{a} \pm 0.43$	$5402.67^{d} \pm 30.11$	$1928.33^{d} \pm 14.74$	$4484.00^{a} \pm 18.25$	$1009.67^{a} \pm 15.15$
	HP 8%	$75.65^{b} \pm 0.57$	$5602.00^{c} \pm 22.11$	$2133.00^{c} \pm 5.66$	$3202.00^{b} \pm 66.47$	$743.00^{b} \pm 11.33$
	HP 10%	$74.55^{c} \pm 0.52$	$5892.00^{b} \pm 49.50$	$2264.67^{b} \pm 8.96$	$2818.67^{c} \pm 15.57$	$681.33^{c} \pm 24.95$
	HP 12%	$73.80^{d} \pm 0.43$	$6039.67^{a} \pm 30.44$	$2360.67^{a} \pm 32.13$	$2556.00^{d} \pm 41.87$	$577.00^{d} \pm 33.15$

Note: banana starches hydroxypropylated with propylene oxide of 8% (HP8), 10% (HP10) and 12% (HP12). Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in the column for each banana starch denote the significant differences ($P<0.05$).

3.2.2 พฤติกรรมการไหล (Flow behavior)

จาก Figure 27 และ Figure 28 พบว่าค่าความหนืดปรากฏของสตาร์ชกล้วยทั้งสองชนิดที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันมีค่าลดลงเมื่ออัตราการเฉือนเพิ่มขึ้น และจาก Table 20 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว (k) ของสตาร์ชกล้วยที่ผ่านการดัดแปรมีค่าเพิ่มขึ้นขณะที่ดรรชนีพฤติกรรมการไหล (n) มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชกล้วยก่อนการดัดแปร แต่อย่างไรก็ตามพบว่าทั้งสตาร์ชกล้วยก่อนและหลังการดัดแปรมีค่า n น้อยกว่า 1 ซึ่งแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ shear-thinning (pseudoplastic) (Morikawa and Nishinari, 2000; Dubois *et al.*, 2001) นอกจากนั้นพบว่าเมื่อระดับความเข้มข้นของสารโพรพิลีนออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า k และค่า n ของสตาร์ชกล้วยทั้งสองชนิดที่ผ่านการดัดแปรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการไหลแบบ shear-thining ที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือมีความคงตัวต่อแรงเฉือนลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการความแข็งแรงของพันธะภายในโครงสร้างของสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรมีค่าลดลง (Perera and Hoover, 1999) ทำให้กำลังการพองตัวมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ความหนืดของสตาร์ชมีค่าเพิ่มขึ้น

Table 20. Consistency coefficient (k) and Flow behavior index (n) of native and modified banana starch hydroxypropylated with propylene oxide of 10% (HP)

Banana type	Treatment	k ($Pa.s^n$)	n
Nang paya	Native	$2.69^{d} \pm 0.14$	$0.53^{a} \pm 0.01$
	HP 8%	$4.62^{c} \pm 0.25$	$0.48^{b} \pm 0.02$
	HP 10%	$5.58^{b} \pm 0.23$	$0.43^{c} \pm 0.03$
	HP 12%	$6.34^{a} \pm 0.13$	$0.36^{d} \pm 0.01$
Hin	Native	$3.68^{d} \pm 0.40$	$0.53^{a} \pm 0.01$
	HP 8%	$4.02^{c} \pm 0.31$	$0.50^{b} \pm 0.02$
	HP 10%	$4.81^{b} \pm 0.25$	$0.46^{c} \pm 0.01$
	HP 12%	$5.91^{a} \pm 0.28$	$0.38^{d} \pm 0.03$

Note: banana starches hydroxypropylated with propylene oxide of 8% (HP8), 10% (HP10) and 12% (HP12). Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in the column for each banana starch denote the significant differences ($P<0.05$).

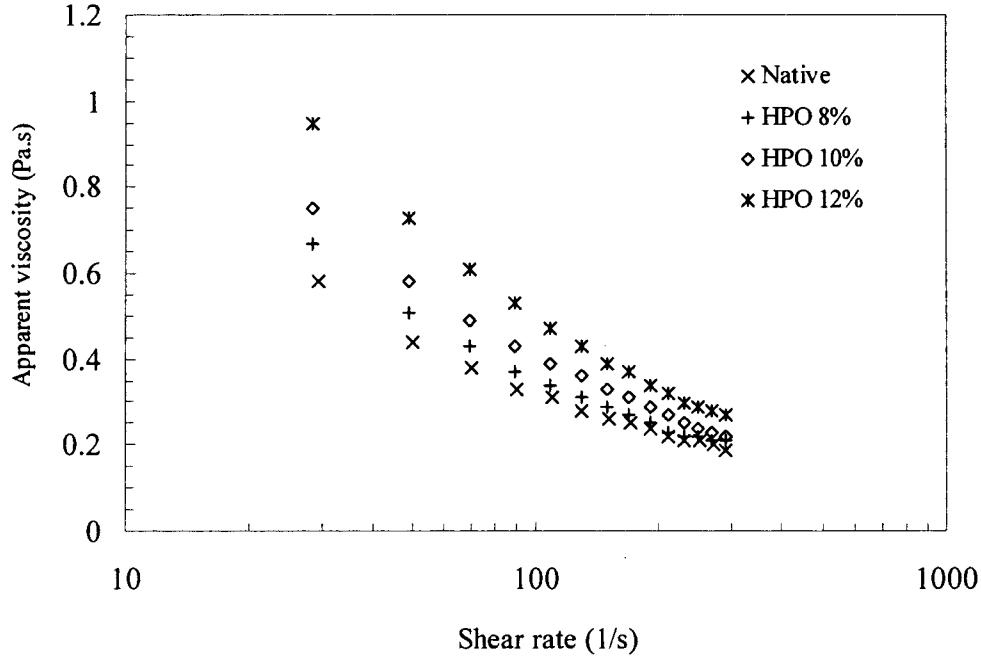


Figure 30. Relationship of apparent viscosity and shear rate of native starch and starch hydroxypropylated with propylene oxide (HPO) at various concentrations. Starch obtained from Nang paya banana.

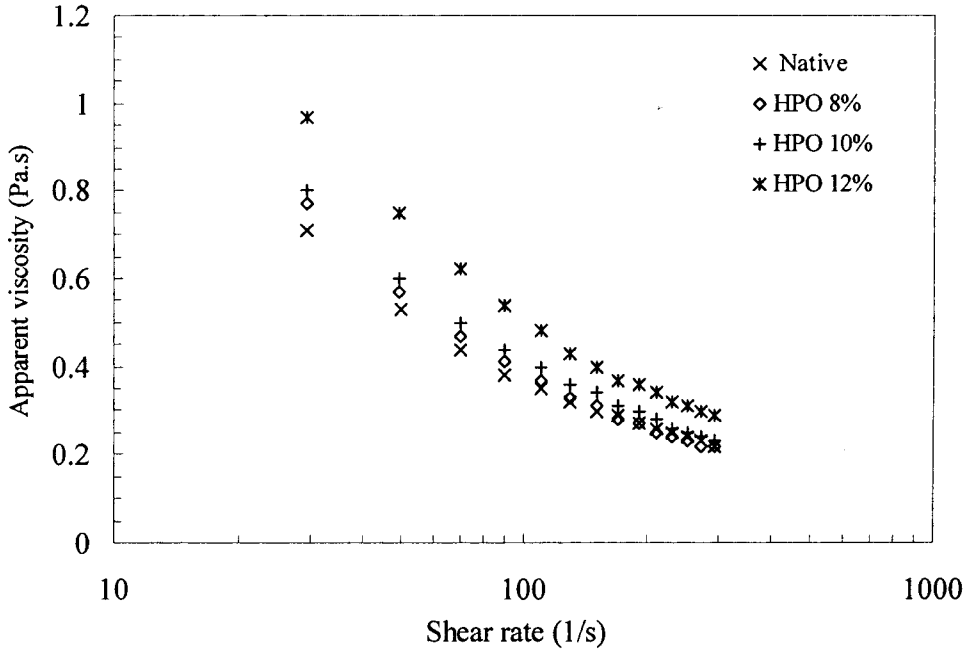


Figure 31. Relationship of apparent viscosity and shear rate of native starch and starch hydroxypropylated with propylene oxide (HPO) at various concentrations. Starch obtained from Hin banana.

3.2.3 สมบัติวิสโคอิลาสติก (Viscoelastic properties)

จากการวิเคราะห์พารามิเตอร์วิสโคอีลาสติกของสตาร์ชกล้วยทั้งสองชนิดทั้งก่อนและหลังการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชัน พบว่าค่า G' มีค่าสูงกว่าค่า G'' ซึ่งแสดงถึงคุณลักษณะของเจล (Table 21) และพบว่าสตาร์ชกล้วยทั้งสองชนิดที่ผ่านการดัดแปรมีค่า G' ที่ต่ำกว่าขณะที่มีค่า tan δ ที่สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชกล้วยก่อนการดัดแปร นอกจากนั้นพบว่าเมื่อระดับความเข้มข้นของสารโพรพิลีนออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สตาร์ชกล้วยทั้งสองชนิดที่ผ่านการดัดแปรมีค่า G' ลดลง และมีค่า tan δ เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของสตาร์ชด้วยหมู่ไฮดรอกซีโพรพิล เป็นผลให้สายโมเลกุลของอะไมโลสเกิดอันตรกริยาต่อกันได้ยากขึ้น ทำให้โครงร่างตาข่ายของเจลเกิดได้ไม่ดี ความแข็งแรงของเจลจึงมีค่าลดลง (Chuenkamol *et al.*, 2007) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Liu และคณะ (1998) และ Choi และ Kerr (2003)

Table 21. Viscoelastic parameter of native and modified banana starch hydroxypropylated with propylene oxide of 10% (HP) at concentration of 8% (w/w) and at 1 Hz.

Banana type	Treatment	G' (Pa)	G" (Pa)	tan δ
Nang paya	Native	$294.44^{a} \pm 24.47$	$50.24^{d} \pm 1.15$	0.17^{d}
	HP 8%	$253.48^{b} \pm 32.24$	$63.15^{c} \pm 2.45$	0.24^{c}
	HP 10%	$225.26^{c} \pm 27.08$	$76.28^{b} \pm 4.68$	0.34^{b}
	HP 12%	$194.73^{d} \pm 28.16$	$89.25^{a} \pm 4.47$	0.46^{a}
Hin	Native	$371.71^{a} \pm 49.95$	$52.06^{d} \pm 3.11$	0.14^{d}
	HP 8%	$328.52^{b} \pm 37.42$	$85.31^{c} \pm 3.24$	0.26^{c}
	HP 10%	$277.06^{c} \pm 22.45$	$99.26^{b} \pm 3.81$	0.36^{b}
	HP 12%	$213.84^{d} \pm 22.24$	$113.67^{a} \pm 3.42$	0.53^{a}

Note: banana starches hydroxypropylated with propylene oxide of 8% (HP8), 10% (HP10) and 12% (HP12). Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in the column for each banana starch denote the significant differences ($P<0.05$).

3.3 ผลของการดัดแปรสตาร์ชกล้วยต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน

ศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectoscopy (FT-IR) โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงพีคการดูดกลืนแสงที่ 1047 cm^{-1} ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณสายเกลียวคู่หรือปริมาณผลึก และพีคการดูดกลืนแสงที่ 1022 cm^{-1} ซึ่งมีความสัมพันธ์กับส่วนอสัณฐานของสตาร์ช โดยอัตราส่วนของค่าการดูดกลืนแสงที่ 1047 ต่อ1022 cm^{-1} แสดงถึงสัดส่วนของโมเลกุลที่จัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ต่อส่วนอสัณฐาน (RSA) (van Soet *et al.*, 1995)

จากการศึกษาการเก็บรักษาเจลของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันที่ระดับความเข้มข้นของสารโพรพิลีนออกไซด์ร้อยละ12 โดยทำการเก็บรักษาเจลสตาร์ชที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง พบว่าพีคการดูดกลืนแสงอินฟาเรด (FTIR spectra) ที่ 1047 cm^{-1} ของเจลสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองสายพันธุ์หลังการดัดแปรมีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงการเกิดปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น แสดงดัง Figure32 เมื่อพิจารณาค่า RSA สัมพัทธ์ (relative RSA) ของเจลสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชัน (Table 22 และ Table 23) พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่า RSA สัมพัทธ์เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลาการเก็บรักษา 26 ชั่วโมงแรก จากนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวของสายโมเลกุลอะมิโลเพคตินซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านจำนวนมาก การเปลี่ยนแปลงในช่วงนี้จะช่วยให้เกิดการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างผลึกที่สมบูรณ์ขึ้น (Goodfellow and Wilson, 1990; van Soet, 1994; Hoover, 2001) จากการศึกษาเปรียบเทียบค่า RSA สัมพัทธ์ของเจลสตาร์ชกล้วยที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชัน พบว่าค่า RSA สัมพัทธ์ของเจลสตาร์ช กล้วยทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการดัดแปรมีค่าต่ำกว่าของสตาร์ชกล้วยก่อนการดัดแปรตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันสามารถช่วยป้องกันการเกิดอันตรกริยาระหว่างสายโมเลกุลของอะมิโลส/สายโมเลกุลของอะมิโลเพคตินได้ (Perera and Hoover, 1999; Chuenkamol et al., 2007 and Lawal, 2009) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Pal, *et al.*, (2002); Chuenkamol *et al.*, 2007; Kaur *et al.*, (2004); Lawal *et al.*, (2008) และ Law, (2009)

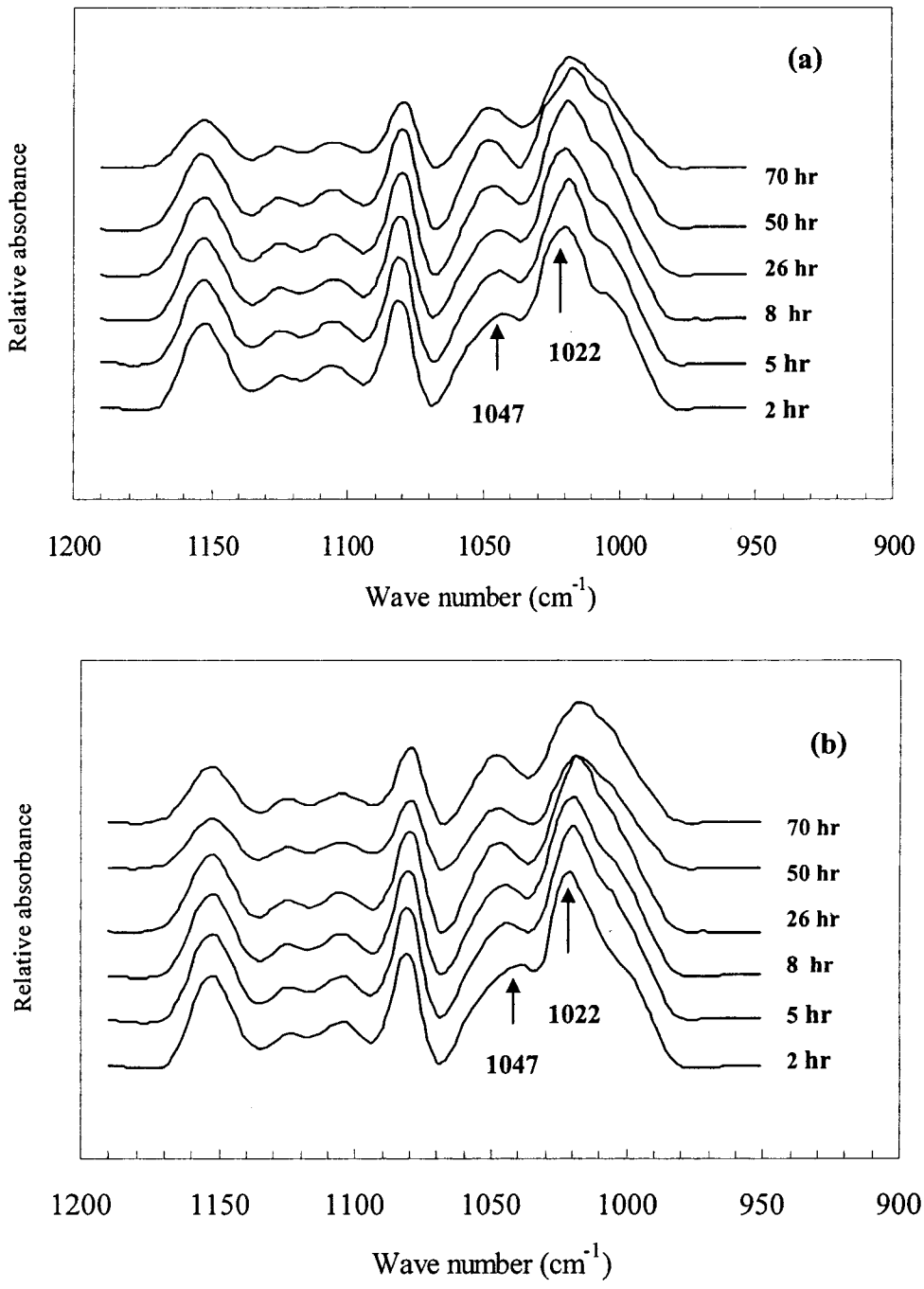


Figure 32. FTIR spectra at various storage times of banana starches (obtained from Nang paya (a) and Hin (b)) hydroxypropylated with 12% propylene oxide.

Table 22. Ratio of short-range molecular order to amorphous (RSA) and relative RSA at various storage times of native starch and starch hydroxypropylated with propylene oxide of 12% from Nang paya.

Storage time	RSA		Relative RSA (%)	
(hr)	Native	$HPO_{12\%}$	Native	$HPO_{12\%}$
2 hr	$0.53^{e} \pm 0.03$	$0.48^{d} \pm 0.01$	65.52	59.70
5 hr	$0.55^{d} \pm 0.03$	$0.51^{c} \pm 0.02$	68.26	63.54
8 hr	$0.57^{c} \pm 0.01$	$0.53^{c} \pm 0.03$	70.30	65.41
26 hr	$0.61^{b} \pm 0.00$	$0.57^{b} \pm 0.04$	75.37	70.24
50 hr	$0.65^{a} \pm 0.00$	$0.58^{a} \pm 0.01$	80.10	71.88
70 hr	$0.65^{a} \pm 0.00$	$0.60^{a} \pm 0.01$	80.09	73.77

Note: Each value is mean of triplicate ± SD. The difference superscripts in each column denote the significant differences ($p < 0.05$).

Table 23. Ratio of short-range molecular order to amorphous (RSA) and relative RSA at various storage times of native starch and starch hydroxypropylated with propylene oxide of 12% from Hin.

Storage time	RSA		Relative RSA (%)	
(hr)	Native	$HPO_{12\%}$	Native	$HPO_{12\%}$
2 hr	$0.51^{d} \pm 0.02$	$0.48^{b} \pm 0.01$	63.66	59.38
5 hr	$0.55^{c} \pm 0.03$	$0.51^{b} \pm 0.00$	68.41	63.75
8 hr	$0.56^{c} \pm 0.02$	$0.52^{ab} \pm 0.01$	69.84	65.63
26 hr	$0.60^{b} \pm 0.00$	$0.56^{ab} \pm 0.00$	75.42	70.00
50 hr	$0.62^{a} \pm 0.02$	$0.58^{a} \pm 0.03$	77.71	72.50
70 hr	$0.63^{a} \pm 0.02$	$0.59^{a} \pm 0.01$	78.98	73.75

Note: Each value is mean of triplicate ± SD. The difference superscripts in each column denote the significant differences ($p < 0.05$).

3.4 ผลของการดัดแปรสตาร์ชกล้วยต่อความสามารถในการย่อย (degree of hydrolysis)

3.4.1 ความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ (Enzyme hydrolysis)

จากการศึกษาความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชโดยใช้เอนไซม์ porcine pancreatic *alpha*–amylase พบว่ารูปแบบการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชัน แสดงดัง Figure 33 โดยพบว่าความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน (two-stage pattern) เช่นเดียวกับการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นโดยช่วงแรกสตาร์ชกล้วยนางพญาถูกย่อยด้วยเอนไซม์อย่างรวดเร็วภายในเวลา 24 ชั่วโมงแรก จากนั้นการย่อยเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จนเข้าสู่สมดุล จากการศึกษาลักษณะปรากฏที่ถูกย่อยด้วยเอ็นไซม์อะมิเลสของเม็ดสตาร์ชกล้วยที่ผ่านการดัดแปรทั้งสองสายพันธุ์ แสดงดัง Figure 34 ซึ่งพบว่าเมื่อถูกย่อยด้วยเอ็นไซม์ 30 ชั่วโมง ผิวหน้าของเม็ดสตาร์ชเกิดเป็นรูพรุน มีลักษณะขรุขระ เกิดรอยแตกร้าว และสึกกร่อนที่บริเวณผิวหน้า และจากการศึกษาพบว่าสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันมีค่าระดับการถูกย่อยด้วยเอนไซม์สูงกว่าสตาร์ชกล้วยก่อนการดัดแปร โดยพบว่าเมื่อระดับความเข้มข้นของสารโพรพิลีนออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นระดับการถูกย่อยด้วยเอนไซม์มีมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Lawal (2009) และ Liu et al. (1999) ทั้งนี้เนื่องจากการที่มีหมู่ไฮดรอกซี โพรพิลปริมาณมากขึ้นเข้าไปแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลภายในโครงสร้างส่วนอสัญฐานของสตาร์ช มีผลให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโมเลกุลของสตาร์ชถูกทำลายได้มากขึ้น ทำให้ความแข็งแรงของพันธะภายในโครงสร้างของสตาร์ชจึงลดลงมากขึ้น ดังนั้นเอนไซม์อะมิเลสจึงสามารถเข้าไปตัดสายโมเลกุลของอะมิโลสในเม็ดสตาร์ชได้มากขึ้น Lawal (2009)

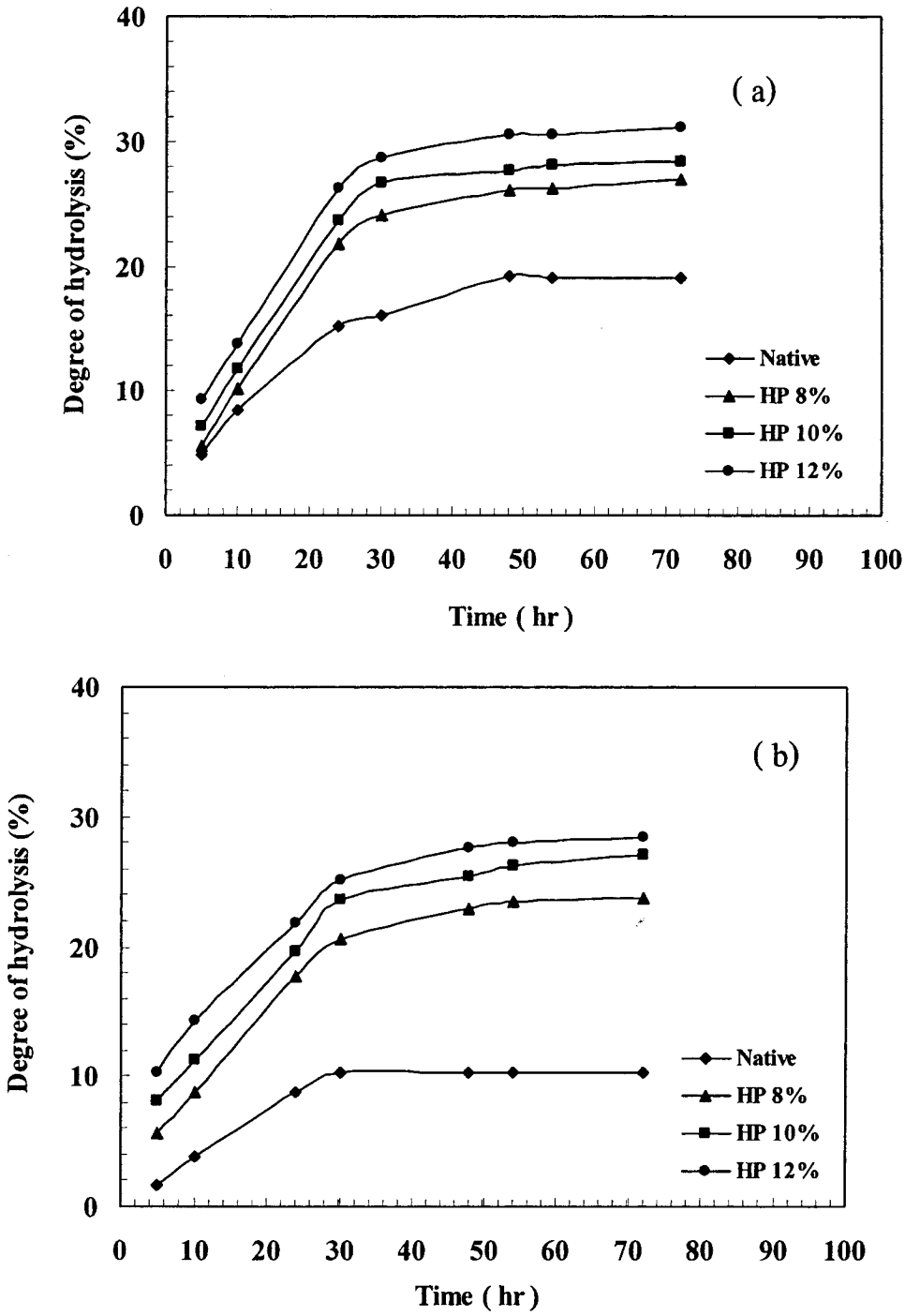
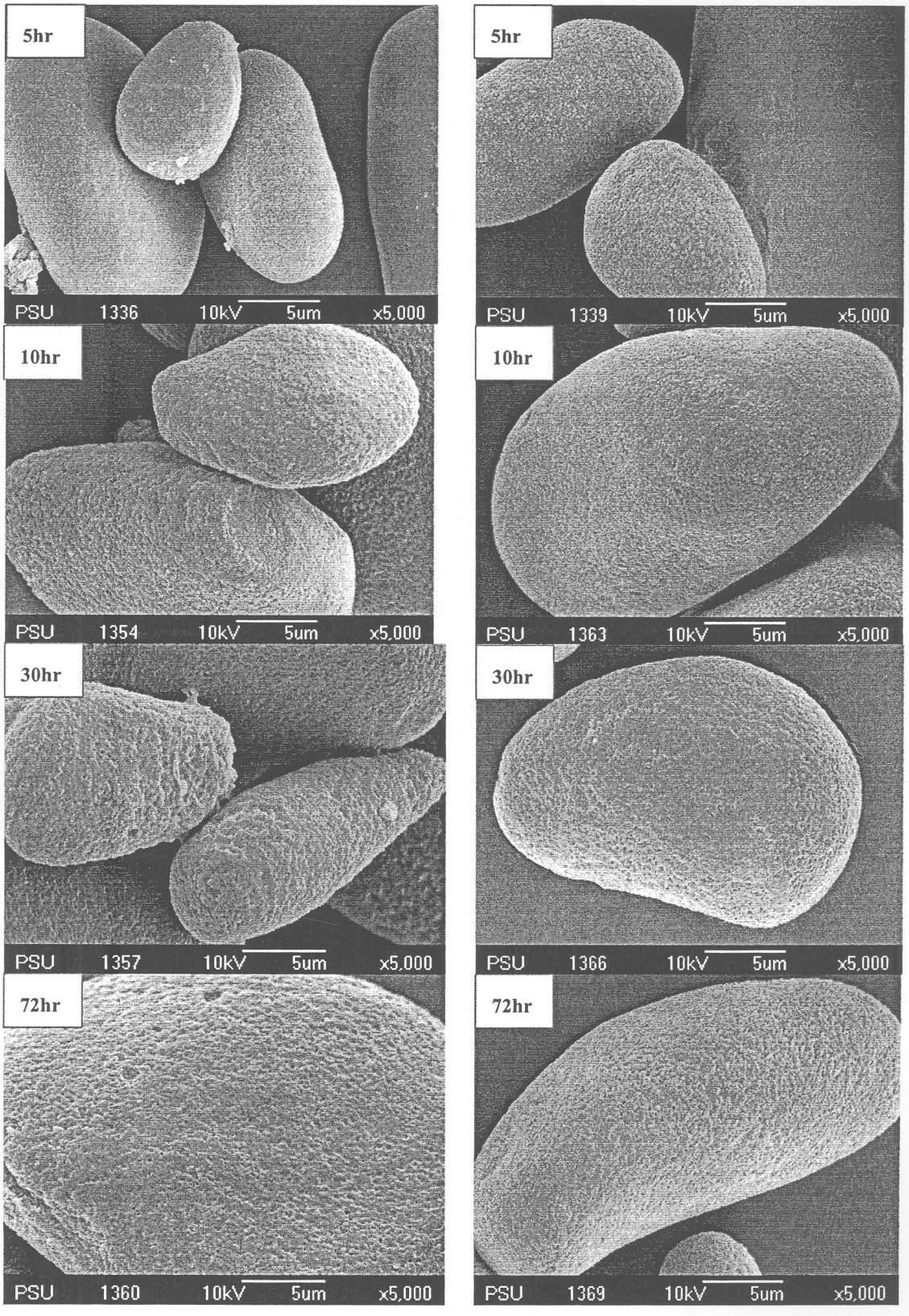


Figure 33. Enzyme hydrolysis of native and modified banana starches from (a) Nang paya (b) Hin hydroxypropylated with propylene oxide of 8% (HP 8%), 10% (HP 10%) and 12% (HP 12%).

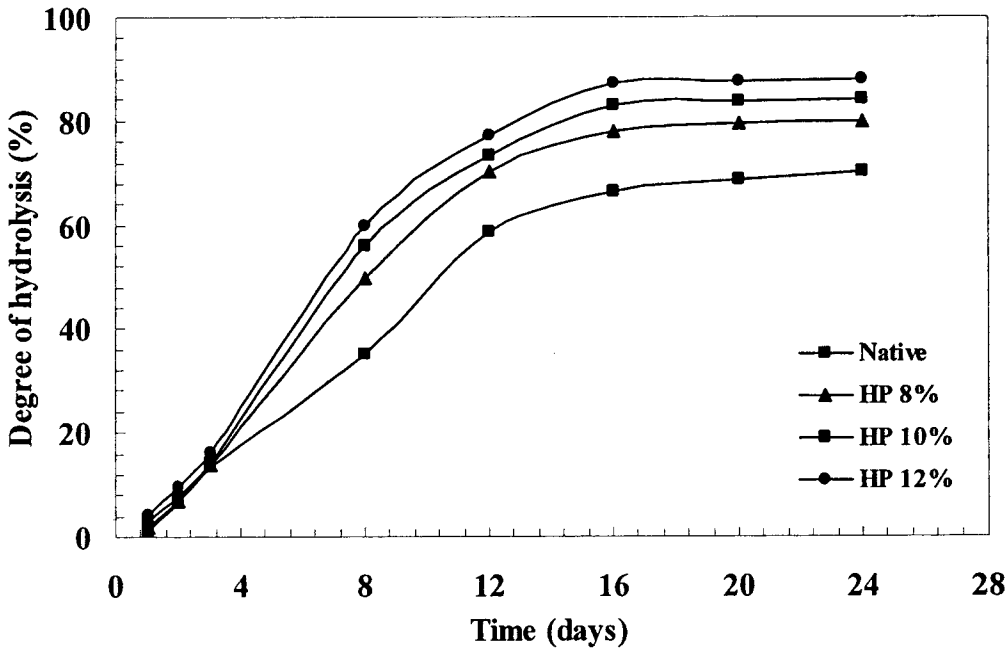


(a) (b)

Figure 34. SEM micrograph (X5000) of banana starch hydroxypropylated with propylene oxide of 12% after attacking by porcine pancreatic ∝–amylase. Banana starch obtained from (a) Nang paya and (b) Hin.

3.4.2 ความสามารถในการถูกย่อยด้วยกรด (Acid hydrolysis)

จากการศึกษาความสามารถในการถูกย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริกของสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชัน พบว่ารูปแบบการถูกย่อยด้วยกรดเป็นแบบ 2 ขั้นตอน (two-stage pattern) เช่นเดียวกับรูปแบบการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ แสดงดัง Figure 35 โดยพบว่าระดับการถูกย่อยด้วยกรดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเวลา 12 วันแรก จากนั้นการย่อยเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จนเข้าสู่สมดุล ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าระดับการถูกย่อยที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกเป็นผลเนื่องจากการทำงานของกรดในบริเวณโครงสร้างส่วนอสัณฐาน (amorphous region) ซึ่งอยู่ใกล้กับบริเวณผิวหน้าของเม็ดสตาร์ช จากนั้นกรดจึงเข้าไปย่อยในบริเวณส่วนที่เป็นผลึก (crystalline region) ซึ่งเป็นส่วนที่มีความแข็งแรง โดยการย่อยเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จนเข้าสู่สมดุล (Kainuma and French,1971; Cairna *et al.*, 1990) นอกจากนั้นพบว่าระดับการถูกย่อยด้วยกรดของสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองสายพันธุ์ภายหลังการดัดแปรมีสูงกว่าสตาร์ชกล้วยก่อนการดัดแปร และเมื่อระดับความเข้มข้นของสารโพรพิลีนออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นพบว่าระดับการถูกย่อยด้วยกรดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น Hoover (2000) ได้รายงานว่าความแตกต่างของความสามารถในการถูกย่อยด้วยกรดของสตาร์ชอาจมีผลมาจากปัจจัยต่างๆ ดังนี้ ขนาดของเม็ดสตาร์ช (granular size) ปริมาณการเกิดอันตรกิริยาของสายโมเลกุลของสตาร์ช ปริมาณโครงสร้างของสายโมเลกุลเกลียวคู่ในบริเวณส่วนที่เป็นอสัณฐาน องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ช อัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพคติน และปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสกับไขมัน



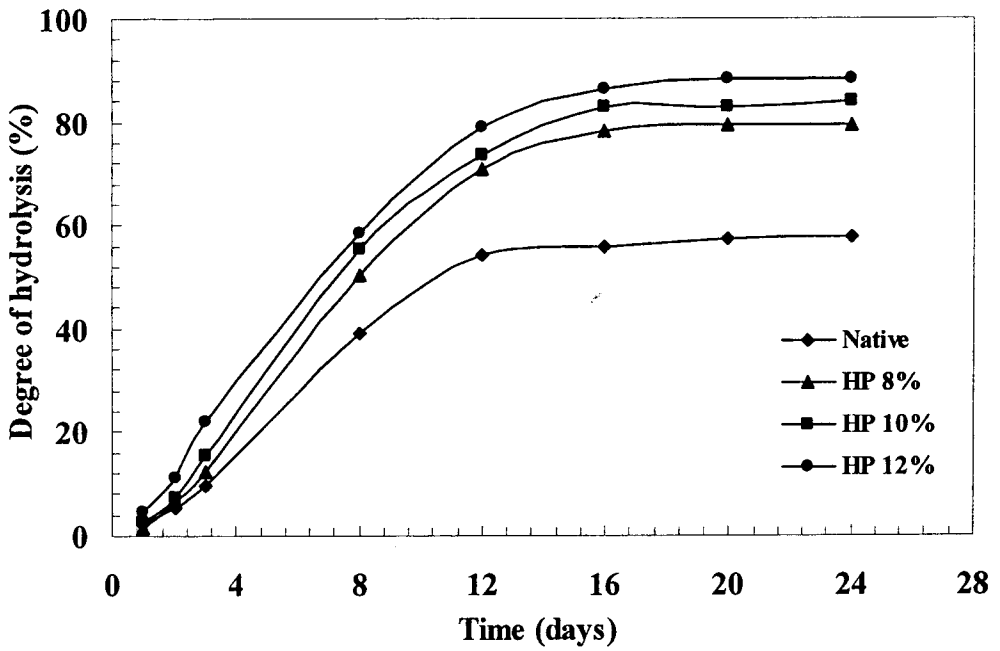


Figure 35. Acid hydrolysis of native and modified banana starches from (a) Nang paya (b) Hin hydroxypropylated with propylene oxide of 8% (HP 8%), 10% (HP 10%) and 12% (HP 12%).

3.5 ผลของการดัดแปรสตาร์ชกล้วยนางพญาต่อปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (resistant starch content)

จากการศึกษาปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองสายพันธุ์ที่ทำการดัดแปรสตาร์ชวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชัน พบว่าปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชกล้วยก่อนการดัดแปร แสดงดัง Table 24 และพบว่าเมื่อระดับความเข้มข้นของสารโพรพิลีนออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ (ข้อ 2.4.1) แต่อย่างไรก็ตามพบว่าถึงแม้ว่าปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันมีค่าค่อนข้างต่ำ แต่ก็ยังคงจัดอยู่ในกลุ่มของสตาร์ชที่มีปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ในระดับสูงมาก (very high) คือมากกว่าร้อยละ 15 (Goni *et al.*, 1996) ซึ่งยังคงมีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพได้

Table 24. Resistant starch content of native and modified banana starch hydroxypropylated with propylene oxide of 8% (HP 8%), 10% (HP 10%) and 12% (HP 12%).

Banana type	Treatment	Resistant starch content (%, db)
Nang paya	Native	$60.16^{a} \pm 0.28$
	HP 8%	$58.46^{b} \pm 0.09$
	HP 10%	$55.91^{c} \pm 1.60$
	HP 12%	$53.74^{d} \pm 1.29$
Hin	Native	$70.52^{a} \pm 0.19$
	HP 8%	$63.25^{b} \pm 0.59$
	HP 10%	$57.14^{c} \pm 1.09$
	HP 12%	$54.13^{d} \pm 1.27$

Note: banana starches hydroxypropylated with propylene oxide of 8% (HP8), 10% (HP10) and 12% (HP12). Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in the column for each banana starch denote the significant differences ($P<0.05$).

ตอนที่ 4 การศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้สตาร์ชกล้วยดัดแปรด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมี

4.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้สตาร์ชกล้วยดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันในผลิตภัณฑ์โดขนมปังแช่เยือกแข็ง

4.1.1 คุณสมบัติของโดขนมปังก่อนการแช่เยือกแข็ง

คุณสมบัติของโดขนมปังก่อนการแช่เยือกแข็งสูตรมาตรฐาน (ชุดควบคุม)และสูตรที่เติมสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรเลชัน (ความเข้มข้นของสารโพรพิลีนออกไซด์ร้อยละ 12) ที่ระดับการทดแทนแป้งสาลีร้อยละ 15 แสดงดัง Table 25 จากผลการทดลอง พบว่าโดที่เติมสตาร์ชกล้วยที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันทั้งจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินมีค่าการยืดขยายตัว ค่าความต้านทานแรงดึง และค่าความเหนียวของโดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับโดสูตรมาตรฐาน เนื่องมาจากการลดลงของปริมาณของกลูเต็นในโด ส่งผลให้ระดับของการเกิดโครงสร้างตาข่ายที่แข็งแรงของกลูเต็น (gluten networking) ในโดลดลง ซึ่งการเติมสตาร์ชกล้วยดัดแปร HP มีผลทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ชและหมู่คาร์บอกซิลของโปรตีนจากแป้งสาลีโดยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งจะป้องกันการขยายตัวอย่างอิสระของโดระหว่างการหมัก ส่งผลให้โดมีค่าความสามารถในการขยายตัวและค่าความคงทนต่อแรงยืดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p< 0.05$) (Wang, *et al.*, 2002) และเนื่องจากในแป้งสาลีมีกลูเตนซึ่งเป็นโปรตีนที่มีสมบัติในการให้ความเหนียวและยืดหยุ่นแก่โด การที่โครงร่างของกลูเตนไม่เพียงพอจะมีอิทธิพลต่อลักษณะของโด ดังนั้นเมื่อเติมสตาร์ชกล้วยดัดแปร HP ทดแทนแป้งสาลีจะทำให้ปริมาณกลูเตนในโดลดน้อยลง มีผลต่อโครงสร้างของโด ทำให้โดมีค่าความเหนียวน้อยลง (Filipovic, *et al.*, 2007) นอกจากนั้นพบว่าสตาร์ชกล้วยดัดแปร HP มีความสามารถในการดูดซับน้ำและเกิดการพองตัวได้ดี ซึ่งเป็นการเพิ่มความเป็นพลาสติกไซเซอร์ (plasticization)ในโครงสร้างของโด จึงส่งผลให้ความแข็งแรงของโดค่าลดลง (Yi, *et al.*, 2009) แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเวลาในการหมักโด (proofing time) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเติมสตาร์ชกล้วยดัดแปร HP ทั้งนี้เนื่องจากเติมสตาร์ช กล้วยดัดแปร HP ทำให้โครงร่างตาข่ายของกลูเตนในโดเกิดความอ่อนตัว ความสามารถในการกักเก็บก๊าซจึงลดลง จึงต้องใช้เวลาในการหมักโดนานขึ้น (Wang, *et al.*, 2002)

Table 25. Properties of dough substituted with 12% hydroxypropylated banana starches (HP) before frozen storage. Banana starches obtained from Nang paya and Hin.

Dough properties	Treatments		
	Control	substitution with 12% HP Nang paya	substitution with 12% HP Hin
Extensibility (mm)	$24.03^{a} \pm 1.20$	$18.44^{b} \pm 0.50$	$20.49^{b} \pm 1.25$
Resistance to extension (g)	$94.66^{a} \pm 4.50$	$76.40^{c} \pm 1.84$	$80.30^{b} \pm 3.33$
Dough stickiness (g)	$231.26^{a} \pm 10.75$	$188.58^{c} \pm 37.08$	$203.32^{b} \pm 13.84$
Proofing time (min)	$55.67^{b} \pm 1.06$	$57.96^{a} \pm 0.69$	$57.02^{a} \pm 2.13$

Note: Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in each row denote the significant differences.

4.1.2 คุณสมบัติของโดขนมปังที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและเก็บรักษาที่ระยะเวลาต่าง ๆ

4.1.2.1 การยืดขยายตัวและการต้านแรงดึงของโด (extensibility and resistance to extension of dough)

จากการศึกษาความสามารถในการยืดขยายตัวและการต้านทานแรงดึงของโดแช่เยือกแข็งที่เติมสตาร์ชกล้วยดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันที่ระดับการทดแทนร้อยละ 12 ได้ผลการทดลองดังแสดงในTable 26 และTable 27 โดยพบว่าค่าความสามารถในการยืดขยายตัวและค่าความความต้านทานแรงดึงของโดมีค่าไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) ภายในระยะเวลาการเก็บรักษาแบบแช่เยือกแข็ง 3 สัปดาห์ แต่อย่างไรก็ตามพบว่ามีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาเก็บรักษานานขึ้นเป็น 4 สัปดาห์ สำหรับโดแช่เยือกแข็งสูตรมาตรฐาน พบว่าค่าความสามารถในการขยายตัวและค่าความคงทนต่อแรงยืดมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาแบบแช่เยือกแข็งเพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 4 สัปดาห์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมสตาร์ชกล้วยดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันส่งผลให้โดแช่เยือกแข็งมีความคงตัวระหว่างการเก็บรักษาแบบแช่เยือกแข็งได้ดีกว่าโดที่ไม่เติมสตาร์ชดัดแปร การเสื่อมสภาพของโดระหว่างการเก็บรักษาแบบแช่เยือกแข็งเกิดได้จากการปลดปล่อยสารรีดิวซิ่ง ได้แก่ กลูทาทิโอน (glutathione) จากเซลล์ยีสต์ระหว่างการแช่เยือกแข็ง ซึ่งสารกลูทาทิโอนนี้ส่งผลให้โดเกิดความอ่อนตัวได้เนื่องสามารถเข้าไปขัดขวางการเกิดพันธะไดซัลไฟด์ในกลูเต็น (Hsu และคณะ 1979) นอกจากนั้น

Varriano-Marston และคณะ (1980) ได้รายงานว่าการเกิดผลึกน้ำแข็งภายในโดส่งผลให้โครงร่างตาข่ายของกลูเตนเกิดความอ่อนตัวลงได้

Table 26. Effect of substitution with 12% hydroxypropylated banana starches (HP) and frozen storage times on extensibility of dough. Banana starches obtained from Nang paya and Hin.

Frozen storage times (weeks)	Extensibility (mm)		
	Control	substitution with 12% HP Nang paya	substitution with 12% HP Hin
1	$22.67^{a} \pm 0.19$	$17.13^{a} \pm 0.94$	$19.02^{a} \pm 0.39$
2	$21.53^{ab} \pm 0.82$	$17.04^{a} \pm 0.71$	$18.99^{a} \pm 0.53$
3	$20.11^{b} \pm 0.62$	$16.94^{a} \pm 0.70$	$18.84^{a} \pm 0.47$
4	$19.29^{c} \pm 0.64$	$15.29^{b} \pm 0.91$	$17.52^{b} \pm 0.43$

Note: Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in the column denote the significant differences.

Table 27. Effect of substitution with 12% hydroxypropylated banana starches (HP) and frozen storage times on resistance to extension of dough. Banana starches obtained from Nang paya and Hin.

Frozen storage times (weeks)	Resistance to extension (g)		
	Control	substitution with 12% HP Nang paya	substitution with 12% HP Hin
1	$85.07^{aA} \pm 5.28$	$76.49^{aB} \pm 1.20$	$79.81^{aA} \pm 4.86$
2	$80.95^{bA} \pm 6.15$	$74.94^{abC} \pm 1.71$	$78.29^{abA} \pm 2.70$
3	$78.61^{cA} \pm 2.44$	$73.89^{bB} \pm 4.77$	$77.67^{bB} \pm 1.50$
4	$73.66^{dA} \pm 3.80$	$64.42^{cC} \pm 4.98$	$67.75^{cB} \pm 4.79$

Note: Each value is mean of triplicate ± SD. The difference superscripts in the column denote the significant differences.

4.1.2.2 ความเหนียวของโด (dough stickiness)

จากการศึกษาค่าความเหนียวของโดแช่เยือกแข็งที่เติมสตาร์ชกล้วยดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันที่ระดับการทดแทนร้อยละ 10 ได้ผลการทดลองดังแสดงในTable 28 โดยพบว่าค่าความเหนียวของโดมีค่าไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) ภายในระยะเวลาการเก็บรักษาแบบแช่เยือกแข็ง 3 สัปดาห์ แต่อย่างไรก็ตามพบว่ามีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาเก็บรักษานานขึ้นเป็น 4 สัปดาห์ สำหรับโดแช่เยือกแข็งสูตรมาตรฐาน พบว่าค่าความเหนียวของโดมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาแบบแช่เยือกแข็งเพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 4 สัปดาห์

Table 28. Effect of substitution with 12% hydroxypropylated banana starches (HP) and frozen storage times on dough stickiness. Banana starches obtained from Nang paya and Hin.

Frozen storage times (weeks)	Dough stickiness (g)		
	Control	substitution with 12% HP Nang paya	substitution with 12% HP Hin
1	$228.42^{a} \pm 7.15$	$187.36^{a} \pm 21.74$	$228.88^{a} \pm 17.51$
2	$191.35^{b} \pm 21.59$	$186.38^{a} \pm 19.54$	$227.98^{a} \pm 9.20$
3	$158.23^{c} \pm 26.22$	$186.77^{a} \pm 14.28$	$227.38^{a} \pm 9.78$
4	$138.73^{d} \pm 19.76$	$183.52^{b} \pm 14.21$	$225.72^{b} \pm 16.32$

Note: Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in the column denote the significant differences.

4.1.2.3 เวลาในการหมักโด (proofing time of dough)

จากการศึกษาเวลาในการหมักโดของโดแช่เยือกแข็งที่เติมสตาร์ชกล้วยดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันที่ระดับการทดแทนร้อยละ 10 ได้ผลการทดลองดังแสดงในTable 29 โดยพบว่าค่าเวลาในการหมักโดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 58.96 เป็น 73.76 นาที และจาก 58.31 เป็น 72.24 นาที เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาแบบแช่เยือกแข็งเพิ่มขึ้นจาก 1 สัปดาห์ เป็น 4 สัปดาห์ สำหรับโดแช่เยือกแข็งที่เติมสตาร์ชกล้วยที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันจากกล้วยนางพญาและกล้วยหิน ตามลำดับ สำหรับโดแช่เยือกแข็งสูตรมาตรฐาน พบว่าเวลาในการหมักโดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จาก 56.48 เป็น 86.29 นาที เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาแบบแช่เยือกแข็งเพิ่มขึ้น

จาก 1 สัปดาห์ เป็น 4 สัปดาห์ เนื่องจากการเกิดผลึกน้ำแข็งภายในโดซึ่งส่งผลให้โครงร่างตาข่ายของกลูเตนเกิดความอ่อนตัวลงนั้น มีผลทำให้เวลาในการหมักโดมีค่าเพิ่มขึ้น (Varriano-Marston *et al.*, 1980)

Table 29. Effect of substitution with 12% hydroxypropylated banana starches (HP) and frozen storage times on proofing time of dough. Banana starches obtained from Nang paya and Hin.

Frozen storage times (weeks)	Proofing time (min)		
	Control	substitution with 12% HP Nang paya	substitution with 12% HP Hin
1	$56.48^{d} \pm 1.67$	$58.96^{c} \pm 0.39$	$59.31^{c} \pm 1.12$
2	$65.60^{c} \pm 2.98$	$62.05^{b} \pm 2.19$	$63.31^{b} \pm 2.11$
3	$75.43^{b} \pm 2.02$	$70.38^{a} \pm 5.97$	$70.01^{a} \pm 5.73$
4	$86.29^{a} \pm 1.05$	$73.76^{a} \pm 2.19$	$72.24^{a} \pm 1.87$

Note: Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in the column denote the significant differences.

4.1.3 คุณสมบัติของขนมปังที่ผลิตจากโดที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง

จากการศึกษาคุณสมบัติของขนมปังที่ผลิตจากโดที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง แสดงดัง Table 30 จากผลการทดลองพบว่าโดที่เติมสตาร์ชกล้วยที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันทั้งจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินมีค่าความแน่นเนื้อและมีค่าสีของเปลือกขนมปังมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ขณะที่ค่าปริมาตรจำเพาะของขนมปังมีค่าน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับขนมปังสูตรมาตรฐาน แต่อย่างไรก็ตามพบว่าค่าสีของเนื้อในขนมปังมีค่าไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากการเติมสตาร์ชกล้วยที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันมีผลทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ชดัดแปรและหมู่คาร์บอกซิลของโปรตีนโดยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งจะป้องกันการขยายตัวอย่างอิสระของโดระหว่างการหมักส่งผลให้โดมีการขยายตัวลดลง (Wang, *et al.*, 2002) เนื้อขนมปังจึงมีความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้น

Table 30. Properties of breads substituted with 12% hydroxypropylated banana starches (HP). Breads were produced from fresh dough.

Bread properties	Control	substitution with 12% HP Nang paya	substitution with 12% HP Hin
Firmness (g)	$223.36^{c} \pm 21.22$	$330.36^{b} \pm 21.22$	$320.09^{a} \pm 18.12$
Specific volume (cm^3/g)	$4.98^{a} \pm 0.10$	$4.38^{b} \pm 0.38$	$4.45^{b} \pm 0.30$
Crumb color (L*)	$79.79^{a} \pm 1.63$	$80.11^{a} \pm 1.47$	$79.70^{a} \pm 1.25$
Crust color (L*)	$66.91^{a} \pm 1.41$	$65.07^{b} \pm 1.38$	$66.86^{ab} \pm 2.81$

Note: Each value is mean of triplicate ± SD. The difference superscripts in each row denote the significant differences.

4.1.4 คุณสมบัติของขนมปังที่ผลิตจากโดที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง

4.1.4.1 ความแน่นเนื้อของขนมปัง (bread firmness)

จากการศึกษาค่าความแน่นเนื้อขนมปังที่ผลิตจากโดแช่เยือกแข็งที่ไม่เติม (สูตรมาตรฐาน) และเติมสตาร์ชกล้วยดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันที่ระดับการทดแทนร้อยละ 12 ได้ผลการทดลองดังแสดงใน Table 31 โดยพบว่าค่าความแน่นเนื้อของขนมปังที่ผลิตจากโดที่เติมสตาร์ชกล้วยดัดแปรซึ่งผ่านการแช่เยือกแข็งและเก็บรักษาแบบแช่เยือกแข็งเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง แต่สำหรับขนมปังสูตรมาตรฐานพบว่าค่าความแน่นเนื้อมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จาก 244.88 เป็น 310.60 g_f เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาโดแบบแช่เยือกแข็งเพิ่มขึ้นจาก 1 สัปดาห์ เป็น 4 สัปดาห์ แสดงให้เห็นว่าการเติมสตาร์ชกล้วยที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชัน ส่งผลให้โดแช่เยือกแข็งมีความคงตัวระหว่างการเก็บรักษาซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ขนมปังที่มีความคงตัวด้วย

Table 31. Effect of substitution with 12% hydroxypropylated banana starches (HP) and frozen storage times of dough on bread firmness.

Frozen storage times (weeks)	Bread firmness (g)		
	Control	substitution with 12% HP Nang paya	substitution with 12% HP Hin
1	$244.88^{b} \pm 37.40$	$336.57^{a} \pm 28.31$	$323.18^{a} \pm 28.09$
2	$269.30^{b} \pm 33.55$	$340.44^{a} \pm 36.49$	$330.35^{a} \pm 28.28$
3	$305.71^{a} \pm 22.99$	$344.00^{a} \pm 38.94$	$331.45^{a} \pm 22.82$
4	$310.60^{a} \pm 11.35$	$344.17^{a} \pm 30.97$	$333.32^{a} \pm 24.26$

Note: Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in the column denote the significant differences.

4.1.4.2 ปริมาตรจำเพาะของขนมปัง (specific volume of bread)

จากการศึกษาค่าปริมาตรจำเพาะของขนมปังที่ผลิตจากโดแช่เยือกแข็งที่ไม่เติม(สูตรมาตรฐาน) และเติมสตาร์ชกล้วยดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันที่ระดับการทดแทนร้อยละ 12 ได้ผลการทดลองดังแสดงใน Table 32 โดยพบว่าค่าปริมาตรจำเพาะของขนมปังที่ผลิตจากโดแช่เยือกแข็งที่เติมสตาร์ชกล้วยที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินมีค่าไม่แตกต่างกันตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาแบบแช่เยือกแข็ง 4 สัปดาห์ แสดงให้เห็นว่าการเติมสตาร์ชกล้วยดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันในโดแช่เยือกแข็ง ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ขนมปังที่มีความคงตัวระหว่างการเก็บรักษาที่ สำหรับขนมปังสูตรมาตรฐานพบว่าค่าปริมาตรจำเพาะมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จาก 4.24 เป็น 3.31 (cm^3/g) เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาแบบแช่เยือกแข็งเพิ่มขึ้นจาก 1 สัปดาห์ เป็น 4 สัปดาห์ ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดผลึกน้ำแข็งภายในโดซึ่งส่งผลให้โครงร่างตาข่ายของกลูเตนเกิดความอ่อนตัวลง ทำให้เกิดการสูญเสียความสามารถในการกักเก็บก๊าซระหว่างการหมักโด ซึ่งส่งผลให้ปริมาตรจำเพาะของขนมปังมีค่าลดลง (Varriano-Marston *et al.*, 1980)

Table 32. Effect of substitution with 12% hydroxypropylated banana starches (HP) and frozen storage times of dough on specific volume of bread.

Frozen storage times (weeks)	Specific volume of bread (cm^3/g)		
	Control	substitution with 12% HP Nang paya	substitution with 12% HP Hin
1	$4.24^{a} \pm 0.28$	$3.65^{a} \pm 0.18$	$3.72^{a} \pm 0.41$
2	$3.92^{b} \pm 0.41$	$3.54^{ab} \pm 0.38$	$3.52^{b} \pm 0.22$
3	$3.68^{c} \pm 0.26$	$3.44^{b} \pm 0.18$	$3.47^{c} \pm 0.09$
4	$3.31^{d} \pm 0.23$	$3.27^{c} \pm 0.11$	$3.24^{c} \pm 0.17$

Note: Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in the column denote the significant differences.

4.1.4.3 ค่าสีของเนื้อในและเปลือกของขนมปัง (crumb and crust color)

จากการศึกษาค่าสีของเนื้อในและเปลือกของขนมปังที่ผลิตจากโดแช่เยือกแข็งที่ไม่เติม (สูตรมาตรฐาน) และเติมสตาร์ชกล้วยดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันที่ระดับการทดแทนร้อยละ 12 ได้ผลการทดลองดังแสดงดัง Table 33 และTable 34 โดยพบว่าค่าสีของเนื้อในและเปลือกของขนมปังที่ผลิตจากโดแช่เยือกแข็งที่เติมและไม่เติมสตาร์ชกล้วยที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันมีค่าไม่แตกต่างกันตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาแบบแช่เยือกแข็ง 4 สัปดาห์

Table 33. Effect of substitution with 12% hydroxypropylated banana starches (HP) and frozen storage times of dough on crumb color of bread.

Treatment	Frozen storage times (weeks)	Crumb color		
		L*	a*	b*
control	1	$80.79^{a} \pm 1.05$	$1.91^{b} \pm 0.21$	$21.62^{ab} \pm 0.97$
	2	$80.45^{ab} \pm 1.58$	$2.02^{a} \pm 0.21$	$21.78^{ab} \pm 0.73$
	3	$80.88^{a} \pm 1.07$	$1.91^{b} \pm 0.14$	$22.81^{a} \pm 7.29$
	4	$80.50^{a} \pm 1.29$	$1.77^{c} \pm 0.17$	$20.99^{b} \pm 0.77$
substitution with 12% HP Nang paya	1	$79.75^{b} \pm 1.08$	$2.18^{a} \pm 0.16$	$22.21^{a} \pm 0.60$
	2	$79.99^{a} \pm 0.99$	$2.24^{a} \pm 0.17$	$22.02^{a} \pm 0.72$
	3	$80.25^{b} \pm 1.45$	$1.88^{b} \pm 0.17$	$20.97^{c} \pm 0.72$
	4	$79.75^{b} \pm 1.20$	$1.94^{b} \pm 0.13$	$21.44^{b} \pm 0.63$
substitution with 12% HP Hin	1	$80.47^{a} \pm 1.47$	$1.92^{b} \pm 0.19$	$20.94^{b} \pm 0.86$
	2	$80.17^{ab} \pm 1.35$	$2.02^{a} \pm 0.21$	$21.36^{a} \pm 0.84$
	3	$79.46^{b} \pm 1.32$	$1.90^{b} \pm 0.15$	$21.19^{ab} \pm 0.69$
	4	$79.99^{ab} \pm 1.34$	$1.81^{c} \pm 0.20$	$21.25^{ab} \pm 0.79$

Note: Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in the column for each treatment denote the significant differences.

Table 34. Effect of substitution with 12% hydroxypropylated banana starches (HP) and frozen storage times of dough on crust color of bread.

Treatment	Frozen storage times (weeks)	Crust color		
		L*	a*	b*
control	1	$67.20^{a} \pm 3.85$	$17.21^{c} \pm 2.98$	$41.81^{c} \pm 2.40$
	2	$67.32^{a} \pm 5.30$	$16.88^{c} \pm 3.18$	$42.98^{b} \pm 1.21$
	3	$66.42^{ab} \pm 3.54$	$17.37^{bc} \pm 2.09$	$43.74^{a} \pm 1.16$
	4	$65.01^{b} \pm 6.85$	$18.28^{b} \pm 3.89$	$43.08^{b} \pm 1.89$
substitution with 12% HP Nang paya	1	$66.60^{a} \pm 4.16$	$15.84^{b} \pm 2.81$	$43.97^{c} \pm 1.27$
	2	$66.61^{a} \pm 2.51$	$16.14^{b} \pm 1.51$	$44.05^{c} \pm 2.22$
	3	$67.18^{a} \pm 4.54$	$17.54^{a} \pm 2.73$	$44.82^{b} \pm 1.01$
	4	$66.97^{a} \pm 1.79$	$17.27^{a} \pm 1.31$	$47.30^{a} \pm 1.36$
substitution with 12% HP Hin	1	$66.36^{a} \pm 4.12$	$17.08^{c} \pm 2.62$	$41.69^{d} \pm 1.60$
	2	$66.44^{a} \pm 4.29$	$18.05^{b} \pm 2.40$	$43.02^{c} \pm 1.57$
	3	$66.19^{a} \pm 3.23$	$19.23^{a} \pm 2.10$	$44.34^{b} \pm 1.12$
	4	$66.32^{a} \pm 4.01$	$18.03^{b} \pm 2.37$	$45.88^{a} \pm 2.93$

Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in the column for each treatment denote the significant differences.

4.2 การประยุกต์ใช้สตาร์ชกล้วยดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นในการเสริมความแข็งแรงให้กับฟิล์มสตาร์ชข้าว

4.2.1 ค่าการต้านทานแรงดึง (Tensile strength)

จากการเสริมความแข็งแรงให้กับฟิล์มสตาร์ชข้าวโดยการเติมสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 พบว่าฟิล์มสตาร์ชข้าวมีค่าการต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) แสดงดัง Table 35 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิลม์สตาร์ชข้าวมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นพบว่าการเติมสตาร์ชกล้วยที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นส่งผลให้ค่าการต้านทานแรงดึงของฟิล์มสตาร์ชข้าวสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับการเติมสตาร์ชกล้วยที่ไม่ผ่านการดัดแปร ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของสตาร์ชกล้วยที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นมีความแข็งแรงขึ้น (ค่ากำลังการพองตัวต่ำ และอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันสูง) สามารถทนต่อความร้อน (ค่าความหนืดมีความคงตัวขณะที่ได้รับความร้อน โดยไม่พบค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) และค่า breakdown) และทนต่อแรงกวน(มีพฤติกรรมการไหลแบบ Newtonian) มากกว่าสตาร์ชกล้วยดิบ

Table 35. Tensile strength of rice starch film and rice starch film added with 15% of native or heat-moisture treated banana starches (27% moisture content, HMT_{27}). Banana starches obtained from Nang paya and Hin.

Treatments	Tensile strength (MPa)
Rice starch	$2.65^{d} \pm 0.61$
Rice starch + Native Nang paya	$4.77^{c} \pm 0.48$
Rice starch + HMT_{27} Nang paya	$6.35^{b} \pm 0.64$
Rice starch + Native Hin	$4.92^{c} \pm 0.41$
Rice starch + HMT_{27} Hin	$7.00^{b} \pm 0.53$

Note: Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in the column for each banana starch denote the significant differences.

4.2.2 ค่าการยืดตัวเมื่อขาด (Elongation at break)

จากการเสริมความแข็งแรงให้กับฟิล์มสตาร์ชข้าวโดยการเติมสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 พบว่าฟิล์มสตาร์ชข้าวมีค่าการยืดตัวเมื่อขาดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่เติมสตาร์ชกล้วย แสดงดัง Table 36 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิลม์สตาร์ชข้าวที่เติมสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นมีโครงสร้างที่แข็งแรงขึ้น จึงเป็นผลให้ความยืดหยุ่นของฟิลม์มีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่าการยืดตัวเมื่อขาดของฟิล์มสตาร์ชข้าวที่เติมสตาร์ชกล้วยที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้น พบว่ามีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

Table 36. Elongation at break of rice starch film and rice starch film added with 15% of native or heat-moisture treated banana starches (27% moisture content, HMT_{27}).

Treatments	Elongation at break (%)
Rice starch	$38.57^{a} \pm 6.99$
Rice starch + Native Nang paya	$7.56^{b} \pm 0.99$
Rice starch + HMT_{27} Nang paya	$5.17^{b} \pm 1.05$
Rice starch + Native Hin	$6.82^{b} \pm 2.28$
Rice starch + HMT_{27} Hin	$4.78^{b} \pm 0.79$

Note: Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in the column for each banana starch denote the significant differences.

4.2.3. ค่าการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeability; WVP)

จากการเสริมความแข็งแรงให้กับฟิล์มสตาร์ชข้าวโดยการเติมสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 พบว่าฟิล์มสตาร์ชข้าวมีค่าการซึมผ่านไอน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) แสดงดัง Table 37 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มสตาร์ชข้าวสามารถป้องกันการซึมผ่านไอน้ำได้มากขึ้น นอกจากนั้นพบว่าการเติมสตาร์ชกล้วยที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นทำให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มสตาร์ชข้าวต่ำกว่าการเติมสตาร์ชกล้วยที่ไม่ผ่านการดัดแปร ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของสตาร์ชกล้วยที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นมีความแข็งแรงมากกว่าของสตาร์ชกล้วยดิบ

Table 37. Water vapor permeability of rice starch film and rice starch film added with 15% of native or heat-moisture treated banana starches (27% moisture content, HMT_{27}). Banana starches obtained from Nang paya and Hin.

Treatments	Water vapor permeability (g .mm /day.m^2.kPa)
Rice starch	$19.35^{a} \pm 1.92$
Rice starch + Native Nang paya	$15.29^{b} \pm 0.92$
Rice starch + HMT_{27} Nang paya	$12.07^{c} \pm 0.46$
Rice starch + Native Hin	$15.71^{b} \pm 1.47$
Rice starch + HMT_{27} Hin	$12.59^{c} \pm 0.97$

Note: Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in the column for each banana starch denote the significant differences.

4.2.4. ค่าความใสของฟิล์ม (Transparency)

จากการเสริมความแข็งแรงให้กับฟิล์มสตาร์ชข้าวโดยการเติมสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 พบว่าฟิล์มสตาร์ชข้าวมีค่าความใสของฟิล์มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) แสดงดัง Table 38 แต่อย่างไรก็ตามพบว่าค่าความใสของฟิล์มสตาร์ชข้าวที่เติมสตาร์ชกล้วยที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

Table 38. Transparency of rice starch film and rice starch film added with 15% of native or heat-moisture treated banana starches (27% moisture content, HMT_{27}). Banana starches obtained from Nang paya and Hin.

Treatments	Transparency (%)
Rice starch	$0.96^{b} \pm 0.09$
Rice starch + Native Nang paya	$1.02^{a} \pm 0.04$
Rice starch + HMT_{27} Nang paya	$1.04^{a} \pm 0.05$
Rice starch + Native Hin	$1.05^{a} \pm 0.06$
Rice starch + HMT_{27} Hin	$1.03^{a} \pm 0.03$

Note: Each value is mean of triplicate ± SD. The different superscripts in the column for each banana starch denote the significant differences.

บทที่ 4

สรุปผลการทดลอง

1. สตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินประกอบด้วยปริมาณอะมิโลสใกล้เคียงกันคือร้อยละ 17.09 และ 16.60 ตามลำดับ รูปร่างของเม็ดสตาร์ชทั้งจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินมีความหลากหลาย ได้แก่ กลมคล้ายไข่ เป็นแท่งยาว และรูปร่างสามเหลี่ยม โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินเท่ากับ 22.99 และ 23.68 ไมโครเมตร ตามลำดับ รูปแบบโครงสร้างผลึกของสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองเป็นแบบ B (B-type) โดยมีปริมาณผลึกใกล้เคียงกันคือร้อยละ 36.81และ 37.73 กำลังการพองตัวของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินมีรูปแบบการพองตัวแบบ 2 ขั้น โดยมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เท่ากับ ร้อยละ 24.72 และ25.25 ตามลำดับ นอกจากนั้นพบว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลาติไนเซชันและอุณหภูมิการเกิดเพสท์ของสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน พฤติกรรมการไหลของสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองเป็นแบบนอนนิวโตเนียนชนิด shear-thinning เจลของสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองสายพันธุ์ (ความเข้มข้นร้อยละ 10)แสดงคุณลักษณะวิสโคอีลาสติก (viscoelastic) โดยมีค่า instantaneous elastic (G_0) เท่ากับ 875.95 Pa (สตาร์ชกล้วยนางพญา) และ 840.28 Pa (สตาร์ชกล้วยหิน) และพบว่าสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองสายพันธุ์นี้มีปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ในระดับที่สูง โดยสตาร์ชกล้วยหิน(ร้อยละ 70.52) มีค่าสูงกว่าของสตาร์ชกล้วยนางพญา (ร้อยละ 60.16)

2. การดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นส่งผลให้รูปแบบโครงสร้างผลึกของสตาร์ชจาก กล้วยนางพญาและกล้วยหินเปลี่ยนแปลงจากแบบ B เป็นแบบ A+B และปริมาณผลึกมีค่าลดลง นอกจากนั้นยังส่งผลให้สายโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ชเกิดอันตรกริยาต่อกัน ทำให้โครงสร้างของสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองสายพันธุ์มีความแข็งแรงมากขึ้น เป็นผลให้กำลังการพองตัว ความสามารถในการละลาย ความหนืด และสัมประสิทธิ์ความคงตัว (consistency coefficient) มีค่าลดลง ขณะที่อุณหภูมิเริ่มต้นการเกิด เจลาติไนเซชันและอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้น และเจลของสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้นโดยแสดงคุณลักษณะ ideal elastic และมีค่า G' และ G_0 เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่าทั้งสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นสามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์และกรดได้มากขึ้นและมีปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชกล้วยก่อนการดัดแปร เมื่อระดับความชื้นในการดัดแปรมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างของสตาร์ชจากกล้วยทั้งสองสายพันธุ์มีความแข็งแรงขึ้น โดยมีค่า กำลังการพองตัวความสามารถในการละลาย และความหนืดมีค่าลดลง ขณะที่อุณหภูมิการเกิด

เจลาติไนเซชัน อุณหภูมิการเกิดเพสท์ และความแข็งแรงของเจล (ค่า G' และ G_o) มีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นพบว่าความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์และกรดมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์มีค่าลดลง เมื่อระดับความชื้นในการดัดแปรเพิ่มขึ้น

จากสมบัติของสตาร์ชกล้วยที่ผ่านการการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นดังกล่าว พบว่ามีความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างของฟิล์มชีวภาพหรือกระดาษ เป็นต้น หรือประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารที่ต้องผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนสูงและใช้แรงเฉือนในกระบวนการผลิต

3. การดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันส่งผลให้ ค่ากำลังการพองตัว ความใส ค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว (k) ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ค่า breakdown ระดับการถูกย่อยด้วยเอนไซม์และกรดของสตาร์ชจากกล้วยนางพญาและกล้วยหินมีค่าสูงกว่าของสตาร์ชกล้วยก่อนการดัดแปร ขณะที่อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดความหนืด ค่า setback ค่าความแข็งแรงของเจล (G') การเกิดรีโทรเกรเดชัน (ค่า RSA) และปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์มีค่าต่ำกว่าของสตาร์ชกล้วยก่อนการดัดแปร นอกจากนั้นพบว่าเมื่อระดับความเข้มข้นของสารโพรพิลีนออกไซด์เพิ่มขึ้น ค่ากำลังการพองตัว ความใส ค่า k ระดับการถูกย่อยด้วยเอนไซม์และกรดของสตาร์ชกล้วยทั้งสองก็มีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซ--ชัน ค่า setback ค่า G' และปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์มีค่าลดลง

จากสมบัติของสตาร์ชกล้วยที่ผ่านการการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชัน พบว่ามีความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแช่เย็นหรือแช่เยือกแข็ง เนื่องจากเกิดรีโทรเกรเดชันได้ต่ำ และมีความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลาย นอกจากนั้นสามารถใช้เป็นสารให้ความข้นหนืด (thickening agent) ในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

4. จากการประยุกต์ใช้สตาร์ชกล้วยที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันในผลิตภัณฑ์ขนมปัง พบว่าโดขนมปังที่ผ่านการแช่เยือกแข็งมีความคงตัวระหว่างการเก็บรักษาแบบแช่เยือกแข็งมากกว่าโดที่ไม่เติมสตาร์ชกล้วยดัดแปร โดยพบว่าค่าการยืดขยายตัว ค่าการต้านทานแรงดึง และค่าความเหนียวของโดแช่เยือกแข็งที่เติมสตาร์ชกล้วยดัดแปรทดแทนแป้งสาลีร้อยละ15 ไม่เปลี่ยนแปลงในระยะเวลาการเก็บรักษาแบบแช่เยือกแข็ง 3 สัปดาห์ และส่งผลให้ค่าความแน่นเนื้อ ปริมาตรจำเพาะ และค่าสีของเนื้อในและเปลือกของขนมปังมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาแบบแช่เยือกแข็ง

จากการประยุกต์ใช้สตาร์ชกล้วยที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นในการเสริมความแข็งแรงให้กับฟิล์มสตาร์ชข้าว พบว่าการเติมสตาร์ชกล้วยดัดแปรปริมาณร้อยละ 15 ส่งผลให้ฟิล์มสตาร์ชข้าวมีความแข็งแรงของโครงสร้างมากขึ้น โดยมีค่าการต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่ความยืดหยุ่นของฟิลม์มีค่าลดลง นอกจากนั้นพบว่ามีความสามารถป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้มากขึ้น และมีลักษณะปรากฏที่ดีขึ้นโดยฟิล์มมีความใสเพิ่มขึ้น

เอกสารอ้างอิง

กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2546. เทคโนโลยีของแป้ง. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 303 หน้า.

โชติ สุวัตถิ. 2505. กล้วยป่าและกล้วยปลูกในเมืองไทย.มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร.

เบญจมาศ ศิลาย้อย.2545. กล้วย. พิมพ์ครั้งที่ 3.สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพ ฯ.

วสันต์ ศิริวงศ์. 2543. สมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชที่สกัดได้จากกล้วยไทยบางชนิด. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต.จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Adebowale, K. O. and Lawal, O. S. 2002. Effect of annealing and heat moisture conditioning on the physicochemical characteristics of Bambara groundnut (Vandzeia subterranea) starch. Nahrung/Food. 46: 311-316.

Adebowale, K. O. and Lawal, O. S. 2003. Microstructure, physicochemical properties and retrogradation behaviour of Mucuna bean (*Mucuna pruriens*) starch on heat moisture treatments. Food Hydrocolloid. 17: 265–272.

Adebowale, K. O., Olu-Owolabi, B. I., Olawumi, E. and Lawal, O. S. 2005. Funtional properties of native, physically and chemically modified breadfruit (*Artocarpus artilis*) starch. Industrial Crops and Products. 21: 343-351.

AOAC. 2000. Official Methods of Analysis : 16thEd.Association of Official Analytical Chemists.

American Society for Testing and Materials (ASTM). 1995. Standard test methods for tensile properties of thin plastics sheeting. D882-91. In ASTM Annual Book of American Standard Testing Methods. Vol 8.01: pp. 182-190. West Conshohochem, PA.

Bhattacharya, M., Langstaff, T.M., and Berzonsky, W.A. 2003. Effect of Frozen Storage and Freeze- thaw cycles on the rheological and baking properties of frozen dough. Food Research International. 36 : 365 – 372

Bello-Perez, L. A., Agama-Acevedo, E., Sanchez-Hernandez, L. and Paredes-Lopez, O. 1999. Isolation and partial characterization of banana starches. J. Agri and Food Chem. 47: 854-857.

Bourtoom, T. and Chinnan, M. S. 2008. Preparation and properties of rice starch-chitosan blend biodegradable film. LWT. Food Sci. Technol. 41: 1633-1641.

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

Chiang, B.H., Chu, W.C., and Chu, C.L. 1987. A pilot scale study for banana starch production. Starch/Starke. 39(1): 5-8.

Choi, S. G. and Kerr, W. L. 2003. Water mobility and texture properties of native and hydroxypropylated wheat starch gels. Carbohydrate Polym. 51: 1-8.

Chuenkamal, B., Puttanlek, C., Rungsardthong, V. and Uttapap, D. 2007. Characterization of low-substituted hydroxypropylated canna starch. Food Hydrocolloids. 21: 1123-1132.

Cooke, D. and Gidley, M. J. 1992. Loss of crystalline and molecular order during starch gelatinization: origin of enthalpic transition. Carbohydr. Res. 227: 103-112.

Collado L. S. and Corke, H. 1999. Heat-moisture treatment effects on sweetpotato starches differing in amylose content. J. of Food Chem. 65: 339-346.

Dubois, M., K.A. Gilles, J.K. Hamilton, P.A. Rebers, and F. Smith. 1956. Colorometric method for determination of sugars and related substances. Anal. Chem. 28(3):350-356.

Dubois, I., Picton, L., Muller, G., Audibert-Hayet, A. and Doublier, J.L. 2001. Structure/Rheological properties relation of crosslinked potato starch suspensions. Journal of Applied Polymer Science. 81: 2480-2489.

Eggleston, G., Swennen, R. and Akoni, S. 1992. Physicochemical studies on starch isolated from plantain cultivars, plantain hybrids and cooking bananas. Starch/Starke. 44: 121-128.

Eerlingen, R. C., Crombez, M. and Delcour, J. A. 1993. Enzyme-resistant starch. I. Quantitative and qualitative influence of incubation time and temperature of autoclaved starch on resistant starch formation. Cereal Chem. 70(3):339–44.

Elliasson, A.-C. 1985. Retrogradation of starch as measured by differential scanning calorimetry. In Hill, R. D. and Munck, L., (Ed). New Approaches to Research on Cereal Carbohydrates. p p 93-98.

Faisant, N., Gallant, D.J., Bouchet, B., and Champ, M. 1995. Banana starch breakdown in the human intestine studied by electron microscope. Eur. J. Clin. Nutr. 49:98-104.

Filipovic, N., Djuric, M. and Gyura, J. 2007. The effect of the type and quantity of suger – beet fibers on bread characteristics. J. Food Eng. 1047 – 1053.

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

Goni, I., Garcia-Diz, L., Manas, E. and Saura-Calixto, F. 1996. Analysis of resistant starch: a method for foods and food products. Food chem. 56:445-449.

Gunaratne, A., and Hoover, R. 2002. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches . Carbohydr. Polym. 49: 425-437.

Gunaratne, A. and Cork, K. 2007. Effect of hydroxypropylation and alkaline treatment in hydroxypropylation on somestrural and physicochemical properties of heat-moisture treated wheat, potato and waxy maize starches. Carbohydrate Polym. 68: 305-313.

Han, J. H. and Floros, J. D. 1997. Casting antimicrobial packaging films and measuring their physical properties and antimicrobial activity. J. Plastic Film Sheet. 13 : 287-298.

Hoover, R., Hannouz, D. and Sosluski, F. W. 1988. Effect of hydroxypropylation on thermal properties, starch digestibility freeze-thaw stability of field pea starch. Starch/ Starke. 40: 383-387.

Hoover, R. and Vassanthan, T. 1994. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of cereal, tuber, and legume starches. Carbohydr. Res. 252: 33-53.

Hoover, R. and Manuel, H. 1996a. The effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of legume starches. Food. Res. Inter. 29: 731-750.

Hoover, R. and Manuel, H. 1996b. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of normal maize, waxy maize, dull waxy maize and

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

Hsu, K., Hoseney, R. and Seib, S. 1979. Frozen dough. I. Factors affecting the stability of yeasted doughs. Cereal Chem. 56: 419-424.

Hung, P.V. and Morita, N. 2005. Physicochemical Properties of Hydroxypropylated and cross-linked starches from a-type and b-type wheat starch granules. Carbohydrate Polym. 59: 239-246 .

Jyothi, A. N., Rajasckharan, K. N., Moorthy, S. N. and Sreekumar, J.. 2005. Synthesis and characterization of low DS succinate derivative of cassava starch. Starch/ Starke, 57, 319-324.

Kainuma, K. and French, D. 1971. Nageli amylodextrin and its relationship to starch granule structure. I. Preparation and properties of amylodextrins from various starch types. Biopolymers. 10:1673-1680.

Kaur, L., Singh, N. and Singh, J. 2004. Factors influencing the properties of hydroxypropylated potato starch. Carbohydrate Polym. 22: 31-35.

Kayisu, K. and Hood, L.F. 1981. Characterization of starch and fiber of banana fruit. J. Food Sci. 46: 1885-1890.

Kim, H. R. and Eliasson, A. C. 1993. The influence of molar substitution on the thermal transition properties of hydroxypropyl potato starches. Carbohydrate polym. 22: 31-35.

Kulp, K. and Lorenze, K. 1981. Heat-moisture Treatment of Starch : I Physicocchemical Properties. Cereal Chem. 46-52.

Lawal, O. S. 2005. Studies on the hydrothermal modifications of new cocoyam (*Xanthosoma sagittifolium*) starch. International Journal of Biological Macromolecules. 37: 268-277.

Lawal, O. S. 2009. Starch hydroxyalkylation: Physicochemical properties and enzymatic digestibility of native and hydroxypropylated finger millet starch. Food Hydrocolloids. 23: 415-425.

Lii, C. Y., Chang, S. M. and Young, Y. L. 1982. Investigation of physical and chemical properties of banana starch. J. Food Sci. 47: 1493-1497.

Ling, L.H., Osman, E.M., Fernand, J.B and Reilly, P.J. 1982. Physical properties of starch from Cavendish banana fruit. Starch/Starke. 34: 184-188.

Liu, H., Ramsden, L. and Corke, H. 1998. Physical properties and enzymatic digestibility of hydroxypropylated ae, wx, and normal maize starch. Carbohydrate Polym. 40: 175-182.

McCleary, B.V. and Monaghan, D.A. 2002. Measurement of resistant starch. J. AOAC international. 85(3): 665-675.

McHugh, T. H. and Krochta. J. M. 1994. Water vapor permeability properties of edible whey protein-lipid emulsion film. J. Amer. Oil Chem. Soc. 71: 307-312.

Morikawa, K. and Nishinari, K. 2000. Rheological and DSC studies of gelatinization of chemically modified starch heated at various temperatures. Carbohydrate Polym. 43 : 241-247.

Nemeth, L. J., Paulley, F.G. and Preston, K.R. 1996. Effect of ingredients and processing conditions on the frozen dough bread quality of a Canada Western Red Spring wheat flour during prolonged storage. Food Research Inter. 29(7) : 609 – 616.

Niba, L. L. 2002. Resistant starch: a potential functional food ingredient. *Nutrition and Food Science.* 32: 62-67.

Nunez-Santiago, M. C., Bello-Perez, L. A. and Tecante, A. 2004. Swelling-solubility characteristic Granule size distribution and rheological behavior of banana (*Musa paradisiaca*) starch. Carbohydr. Polym. 56: 65-75.

Pal, J., Singhal, R.S., Kulkarni, P.R. 2002. Physicochemical properties of hydroxypropyl derivative from corn and amaranth starch. Carbohydrate Polym. 48 : 49-53.

Perera, C. and Hoover, R. 1999. Influence of hydroxypropylation on retrogradation properties of native and heat-moisture treated potato starches. Food Chem. 64: 361-375.

Ranhotra, G. S., Gelroth, J. A. and Glaser, B. K. 1996. Effect of resistant starch on blood and liver lipids in hamsters. Cereal Chem. 73(2): 176-178.

Rayas-Duarte, P., Robinson, S.F., and Freeman, T.P. 1995. In situ location of starch granule protein in duram wheat endosperm by immunocytochemistry. Cereal Chem. 72: 269-274.

Schoch, T. J. and Maywald, F.C. 1968. Preparation and properties of various legume starch. Cereal Chem. 45: 564-573.

Seow, C. G. and Thevamalar, K. 1993. Internal Plasticization of granular rice starch by hydroxpropylation: Effect on phase transition associated. Starch/Starke. 45: 85-88.

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

Shi, X. and BeMiller, J. N. 2000. Effect of Sulfate and citrate salts on derivatization of amylase and amylopectin during hydroxypropylation of corn starch. Carbohydrate polym. 43: 333-336.

Singh, S., Raina, C. S. Bawa, A. S. and Saxena, D. C. 2005. Effect of heat-moisture treatment and Acid modification on rheological, textural, and differential scanning calorimetry

characteristics of sweetpotato sarch. Food Engineering and Physical Properties. 70: 373-378.

Siriwong, W., Tulyathan, V. and Waiprib, Y. 2003. Isolation and physicochemical characterization of starches from different banana varieties. J. Food Bio. 27: 471-484.

Stable Micro System.1995. Extensibility of Dough and measure of Gluten quality. In Manual of TA.XT2 Texture Analyser. Stable Micro System Ltd.

Stute, R. 1992. Hydrothermal modification of starches: The difference between annealing and heat/moisture-treatment. Starch/Starke. 44: 205–214.

Suwanliwong, S. 1998. Preparation and characterization of hydroxypropylated crosslinked sago starch for application in acid, frozen and canned foods. Food Science and Biotechnology University Putra Malaysia. 183 p.

Tester, R. F. and Morrison, W. R. 1990. Swelling and gelatinization of cereal starches. I. Effect of amylopectin, amylose and lipids. Cereal Chemistry, 67: 551–559.

Thompson, D. B. 2000. Strategies for manufacture of resistant starch. *Trends in Food Science & Technology*. 11: 245-253.

van Soet, J. J. G., Tournois, H., de Wit, D. J. F. and Vliegenthart, J. F. G.. 1995. Shot-range structure in (partially) crystalline potato starch determined with attenuated total reflectance Fourier-transform IR spectroscopy. Carbohydr. Res. 279: 201-214.

Varriano-Marston, E., Hsu, K. H. And Mahdi, J. 1980. Rheological and structural changes in frozen dough. Baker's Digest. 54: 32-34, 41.

Waliszewski, K. N., Aparicio, M. A., Bello, L. A. and Monroy, J. A. 2003. *Carbohydrate Polm.* 52: 237-242.

Wang. J., Rosell, C.M. and Carmen B.B. 2002 Effect of the addition of different fibres on wheat dough performance and bread quality. J. Food Chem. 79: 221 – 226.

Whalen, P.J., Bason, R.I. Walker, C.E. and Walliams, P.J. 1997. Measurement of extrusion effects by viscosity profile using the rapid visco analyzer.Cereal Foods World. 42(6):469-475.

Wattanachan, S., Muhammad, S.K.S., Mat Hashim, D. and Rahman.R.A. 2003. Effect of crosslinking and hydroxypropylation levels on dual-modified sago starch properties. J. Food Chem. 80: 463-471.

Whistler, R.L., Smith, R.J., BeMiller, J.N. and Wolfrom, L.M. 1964. Starch : Carbohydrate Chem. Academic press Inc., New York and London.

Whistler, R.L. and BeMiller, J.N. 1997. Cabohydrate Chemistry for food Scientists. Egagam press st Paul, Minnesota, USA.

Yi, J., Johnson, J. W. and Kerr, W. L. 2009. Properties of bread made from frozen dough containing waxy wheat flour. J. Cereal Sci. 50: 364-369.

Zhang, T. and Oates, C. G. 1999. Relationship between alpha-amylase degradation and physico-chemical properties of sweet patato starches. Food Chem. 65: 157-163.

Zobel, H. F., Young, S. N. and Rocca, L. A. 1988. Starch gelatinization: An x-ray diffraction study. Cereal Chem. 65: 443.

ภาคผนวก

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด

1. การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) ด้วยวิธี Somogyi-Nelson, (1944) (Dubios *et al.*,1956)

สารเคมี

- สารละลายกลูโคสมาตรฐาน
- Alkaline copper reagent
- Nelson reagent

วิธีการ

1.1. การเตรียมกราฟมาตรฐานกลูโคสของการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

1.1.1 เตรียมสารละลายน้ำตาลกลูโคสที่ความเข้มข้น 1000 μg/ml

1.1.2 นำสารละลายน้ำตาลกลูโคส1000 μg/ml มาทำให้เจือจางให้มีความเข้มข้น 40, 80, 120, 160 และ 200 μg/ml แสดงดังตารางข้างล่างนี้

ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส (μg/ml)	ปริมาณน้ำกลั่น (ml)	ปริมาณสารละลายน้ำตาลกลูโคส 1000 μg/ml (ml)
40	48	2
80	46	4
120	44	6
160	42	8
200	40	10

1.1.3 ดูดสารละลายที่เตรียมได้ 1 ml ใส่ลงในหลอดทดลอง

1.1.4 เติม Alkaline copper reagent 1 ml ผสมให้เข้ากัน

1.1.5 นำไปต้มในอ่างน้ำเดือด 15 นาที

1.1.6 นำไปทำให้เย็นใน Ice bath

1.1.7 เติม Nelson reagent 1 ml ผสมให้เข้ากัน ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที

1.1.8 เติมน้ำกลั่น 5 ml ผสมให้เข้ากัน

1.1.9 นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร

1.10 Plot graph ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของน้ำตาล โดยให้ค่าการดูดกลืนแสงอยู่แกน Y และความเข้มข้นของน้ำตาลอยู่แกน X หาค่าความชันจากกราฟที่ได้

1.2.การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากตัวอย่าง

1.2.1 ดูดตัวอย่าง (สารละลายสตาร์ชกล้วยก่อนและหลังการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ pullanase ดังข้อ 2.3.2/ สารละลายส่วนใสของสตาร์ชกล้วยที่ผ่านการถูกย่อยด้วยเอนไซม์หรือกรด ดังข้อ 2.6 และ 2.7) อย่างละ 1 ml ใส่ลงไปในหลอดทดลอง

1.2.2 ทำการทดลองดังข้อ 1.1.4 – 1.19

1.3.การคำนวณ

$$\text{ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ } (\mu g/ml) = \frac{Ab_{520} \times Dil}{Slope}$$

Ab_{520} คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร

Dil คือ Dilution

Slope คือ ค่าความชันจากกราฟมาตรฐานกลูโคสของการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

2. การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (total sugar) ด้วยวิธี Phenol-Sulfuric Reaction (Dubios *et al.*,1956)

สารเคมี

- สารละลายซัลฟูริกเข้มข้น
- Phenol solution ความเข้มข้นร้อยละ 0.5

วิธีการ

2.1. การเตรียมกราฟมาตรฐานกลูโคสของการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด

2.1.1 เตรียมสารละลายน้ำตาลกลูโคสที่ความเข้มข้น 100 μg/ml

2.1.2 นำสารละลายน้ำตาลกลูโคส 100 μg/ml มาทำให้เจือจางให้มีความเข้มข้น 20, 40, 60, 80 g/ml แสดงดังตารางข้างล่างนี้

ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส (μg/ml)	ปริมาณน้ำกลั่น (ml)	ปริมาณสารละลายน้ำตาลกลูโคส 100 μg/ml (ml)
20	8	2
40	6	4
60	4	6
80	2	8

2.1.3 ดูดสารละลายที่เตรียมได้ 1 ml ใส่ลงในหลอดทดลอง

2.1.4 ใส่สารละลาย 5% phenol ลงในหลอดทดลอง 1 ml ผสมให้เข้ากันอย่างรวดเร็วด้วย mixer

2.1.5 ใส่สารละลายซัลฟูริกเข้มข้น 5 ml ผสมให้เข้ากันอย่างรวดเร็วด้วย mixer

2.1.6 ตั้งทิ้งไว้ในตู้ดูดควันเป็นเวลา 30 นาที

2.1.7 นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 485 นาโนเมตร

2.1.8 Plot graph ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของน้ำตาล โดยให้ค่าการดูดกลืนแสงอยู่แกน Y และความเข้มข้นของน้ำตาลอยู่แกน X หาค่าความชันจากกราฟที่ได้

2.2 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมดจากตัวอย่าง

2.2.1 ดูดตัวอย่าง (สารละลายสตาร์ชกล้วยที่ผ่านการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ pullulanase ดังข้อ 2.3.2/ สารละลายสตาร์ชกล้วยก่อนการดัดแปรที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 ซึ่งผ่านการให้ความร้อนในอ่างน้ำเดือดเป็นเวลา 20 นาที อย่างละ 1 ml ใส่ลงไปในหลอดทดลอง

2.2.2 ทำการทดลองดังข้อ 2.1 (ข้อ 2.1.4- 2.1.8)

2.3 การคำนวณ

ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (μg/ml) = $\frac{Ab_{485} \times Dil}{Slope}$

Ab_{485} คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 485 นาโนเมตร

Dil คือ Dilution

Slope คือ ค่าความชันจากกราฟมาตรฐานกลูโคสของการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด