



วิทยานิพนธ์

ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างละเอียดของสตาร์ชข้าวแอมิโลสสูงและ
สมบัติทางกลของสตาร์ชฟิล์ม

RELATIONSHIP BETWEEN FINE STRUCTURE OF HIGH
AMYLOSE RICE STARCH AND MECHANICAL PROPERTIES
OF THEIR FILMS

นายณพล พงษ์ไพโรจน์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2550



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การอาหาร)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์การอาหาร

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างละเอียดของสตาร์ชข้าวแอมิโลสสูงและสมบัติทางกลของสตาร์ชฟิล์ม

Relationship between Fine Structure of High Amylose Rice Starch and Mechanical Properties of Their Films

นามผู้วิจัย นายณพล พงษ์ไพโรจน์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์น้ำฝน ลำดับวงศ์, Ph.D.)

กรรมการ

(ศาสตราจารย์อรอนงค์ นัยวิกุล, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภาณุวัฒน์ สรรพกุล, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนบูลย์ สัจจานันตกุล, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อัจฉรญาณ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างละเอียดของสตาร์ชข้าวแอมิโลสสูง
และสมบัติทางกลของสตาร์ชฟิล์ม

Relationship between Fine Structure of High Amylose Rice Starch
and Mechanical Properties of Their Films

โดย

นายณพล พงษ์ไพโรจน์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรการอาหาร)
พ.ศ. 2550

ณพล พงษ์ไพโรจน์ 2550: ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างละเอียดของสตาร์ชข้าวแอมิโลสสูงและสมบัติทางกลของสตาร์ชฟิล์ม ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การอาหาร) สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหารที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์น้ำฝน ลำดับวงศ์, Ph.D. 86 หน้า

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างละเอียด, สมบัติทางเคมี และ สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของสตาร์ช และสมบัติทางกลของสตาร์ชฟิล์มจากข้าวไทยแอมิโลสสูง 7 พันธุ์ที่มีปริมาณแอมิโลสสูง (ระหว่าง 30 – 34 %, $p > 0.05$) พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของสตาร์ช มีค่า $3.80 \times 10^5 - 8.54 \times 10^5$ ดาลตันเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี Park&Johnson และมีค่า $3.07 \times 10^6 - 3.68 \times 10^6$ ดาลตันเมื่อคำนวณจากสมการ สำหรับแอมิโลสและแอมิโลเพกทินมีน้ำหนักโมเลกุล $9.06 \times 10^4 - 1.68 \times 10^5$ ดาลตัน และ $4.34 \times 10^6 - 5.18 \times 10^6$ ดาลตัน ตามลำดับ ลักษณะความเป็นกิ่งของสตาร์ชข้าวแสดงจากค่าร้อยละปีตา-แอมิโลซิซอยู่ในช่วง 58.70 – 69.20 และความยาวสายโซ่เฉลี่ย เท่ากับ 22.9 – 25.4 หน่วยกลูโคส การกระจายตัวของสายโซ่ของสตาร์ชข้าวที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ไอโซแอมิเลสพันธุ์ทุเรียน 60 เป็นแบบ 2 พิก และพันธุ์ปราจีนบุรี 1 และสุพรรณบุรี 90 เป็นแบบ 4 พิก สำหรับสตาร์ชข้าวพันธุ์อื่นเป็นแบบ 3 พิก และสามารถแบ่งสตาร์ชข้าวไทยแอมิโลสสูงทั้ง 7 พันธุ์ตามอุณหภูมิการเกิดเจลที่ในซได้ 3 แบบ (อุณหภูมิการเกิดเจลที่ในซสูงสุด, Tp ต่ำ, ปานกลาง และสูง) นอกจากนี้ฟิล์มสตาร์ชขึ้นรูปจากข้าวทั้ง 7 พันธุ์สมกับกลีเซอรอลร้อยละ 50 ของน้ำหนักสตาร์ช มีความต้านทานแรงดึง การยืดตัว และค่าโมดูลัสของยัง คือ 1.4 – 2.9 เมกะพาสคาล, ร้อยละ 35-55 และ 20 – 70 เมกะพาสคาล ตามลำดับ พบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเกิดเจลที่ในซ (GT) กับสายโซ่สั้น (DP 6 -12) ในเชิงลบ ($r = -0.8$, $p < 0.05$) และในเชิงบวกกับสายโซ่ยาว (DP 36 - 53) ($r = 0.6$, $p < 0.05$) เอนทัลปี (ΔH) มีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับสายโซ่สั้น ($r = -0.7$, $p < 0.05$) และในเชิงบวกกับสายโซ่ยาว ($r = 0.7$, $p < 0.05$) นอกจากนี้กลุ่มสายโซ่สั้นมีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับค่าความหนืดลดลง (breakdown) ($r = -0.7$, $p < 0.01$) และค่าการคืนตัว (setback) ($r = -0.5$, $p < 0.05$) ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างละเอียดกับสมบัติทางกลของสตาร์ชฟิล์มพบว่าสายโซ่สั้นมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับร้อยละการยืดตัว ($r = 0.6$, $p < 0.01$) และในเชิงลบกับความต้านทานแรงดึงของฟิล์ม ($r = -0.5$, $p < 0.01$) และค่าโมดูลัสของยัง ($r = -0.6$, $p < 0.01$) GT มีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับร้อยละการยืดตัวของฟิล์ม ($r = -0.79$, $p < 0.01$) และ ΔH มีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับร้อยละการยืดตัวของฟิล์ม ($r = -0.80$, $p < 0.01$) นอกจากนี้ร้อยละการยืดตัวมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับค่าความหนืดต่ำสุด (trough) ($r = 0.57$, $p < 0.05$) ในเชิงลบกับค่าความหนืดลดลง ($r = -0.77$, $p < 0.01$) และในเชิงลบกับค่าการคืนตัว ($r = -0.67$, $p < 0.01$) ทำให้อาจกล่าวได้ว่าการผลิตสตาร์ชฟิล์มที่มีการยืดตัวได้ดี ควรเลือกใช้สตาร์ชที่มีจำนวนกลุ่มสายโซ่สั้นมาก และมีค่า GT และ ΔH ต่ำ และรูปแบบของกราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชอาจสามารถใช้ในการทำนายสมบัติการยืดตัวของสตาร์ชฟิล์มข้าว

Napon Pongpairoj 2007: Relationship between Fine Structure of High Amylose Rice Starch and Mechanical Properties of Their Films. Master of Science (Food Science), Major Field: Food Science, Department of Food Science and Technology. Thesis Advisor: Assistant Professor Namfone Lumdubwong, Ph.D. 86 pages.

The objectives of the study were to investigate fine structure, chemical, and physico-chemical properties of Thai high amylose rice starches (HAM-RS), and mechanical properties of their films. Rice starches were isolated from seven varieties of Thai HAM rice flour, with similar amylose (AM) contents (between 30 -34 %, $p > 0.05$). The number average molecular weight ($\overline{Mn}$) of the starches range from 3.80×10^5 to 8.54×10^5 Daltons and from 3.07×10^6 to 3.68×10^6 Daltons, when determined by the modified method of Park and Johnson and the equation of Park, respectively. $\overline{Mn}$ of AM of the rice starches displayed 9.06×10^4 to 1.68×10^5 Daltons, whereas $\overline{Mn}$ of amylopectin (AP) of the samples displayed 4.34×10^6 to 5.18×10^6 Daltons. The percent of beta-amylolysis (% β -amylolysis) of Thai rice samples was approximately 58 – 69 %. The debranched starches contained average degree of polymerization ($\overline{DPn}$) 22.9 – 25.4. Debranched starch of Pathumthani 60 displayed a bi-modal distribution, whereas Prajeenburi 1 and Suphan Buri 90 showed a quarter-modal distribution. Other debranched samples had a tri-modal distribution. The Thai HAM-RS contained the whole range of peak gelatinization temperatures (low, medium and high T_p). When the HAM-RS films plasticized with 50 % glycerol were casted, the tensile strength was 1.4 – 2.9 MPa. And the percent of elongation and Young's modulus were 35 – 55 %, and 20 – 70 MPa. Both high correlations were observed between a short chain fraction (DP 6 – 12, A) of debranched starches and their gelatinization temperatures (GT) ($r = -0.79$) and between the A and their enthalpies (ΔH) ($r = -0.80$). In contrast, a long chain fraction (DP 37 – 53, B₃) were positively correlated with GT, and ΔH ($r = -0.60$ and 0.70). The A fraction was also negatively correlated with the values of paste breakdown ($r = -0.70$) and setback ($r = -0.50$). A positive correlation was found between the A and elongation of starch films ($r = 0.60$); but the opposite correlation was reported for the A and the values of tensile strength ($r = -0.50$) and Young's modulus ($r = -0.60$). Both GT and ΔH of the starches were negatively correlated with % of the film elongation ($r = -0.79$, and $r = -0.80$). Also, the elongation of the samples was positively correlated with the trough values ($r = 0.57$), but negatively correlated with the values of paste breakdown ($r = -0.77$) and setback ($r = -0.67$) of the pasting curves. It is suggested that HAM-RS films with high % elongation were possibly produced from rice starches containing a high proportion of A and low GT, and the elongation property of the film was probably predicted using RVA profiles of the starches.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์น้ำฝน ลำดับวงศ์ ประธานกรรมการ ผู้ที่
กรุณาให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และคำแนะนำต่างๆ ตลอดการทำงานวิจัย รวมทั้ง
ศาสตราจารย์อรอนงค์ นัยวิกุลกรรมการสาขาวิชาเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภาณุวัฒน์ สรรพกุล
กรรมการสาขาวิชารอง และผู้ช่วยศาสตราจารย์วิพิมพ์ ฌวิสุข ที่กรุณาให้คำปรึกษาตรวจแก้ไข
รูปเล่มวิทยานิพนธ์ และขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่กรุณาให้ความรู้และคำแนะนำทาง
วิชาการในด้านต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนในการศึกษาด้านทุนทรัพย์และ
กำลังใจตลอดมา ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้การ
สนับสนุนทุนอุดหนุนวิจัย มก. ประจำปีงบประมาณ 2546 โครงการเสริมสร้างความเข้มแข็งด้าน
การวิจัย มก. และขอขอบคุณคุณบัณฑิต บุญทาที่ได้กรุณาวิเคราะห์รูปแบบการกระจายตัวของ
สายโซ่ของสตาร์ชด้วยเครื่อง HPAEC-PAD

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ทุกคนในภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการ
อาหาร ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, โครงการจัดตั้ง
ภาควิชาเทคโนโลยีทางกระบวนการเคมีและฟิสิกส์ ที่คอยช่วยเหลือ และเอาใจใส่ตลอดมา
รวมถึง ผู้มีพระคุณท่านอื่นๆ ที่มีได้เอื้อนนาม

ณพล พงษ์ไพโรจน์

เมษายน 2550

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	21
อุปกรณ์	21
วิธีการ	23
ผลและวิจารณ์	29
สรุปและข้อเสนอแนะ	51
สรุป	51
ข้อเสนอแนะ	53
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	54
ภาคผนวก	65
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์	66
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์อุณหภูมิการเกิดเจลลาติโนเซชันด้วย	
เครื่อง differential scanning calorimeter	78
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	86

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	องค์ประกอบของแป้งข้าวเจ้า	29
2	ปริมาณแอมิโลสและองค์ประกอบของสตาร์ชข้าวเจ้าแอมิโลสสูง 10 พันธุ์	31
3	สมบัติเชิงเคมีฟิสิกส์ของแป้งข้าวเจ้า	32
4	สมบัติเชิงเคมีฟิสิกส์และสมบัติเชิงกายภาพของสตาร์ชข้าวเจ้า	33
5	โครงสร้างละเอียดของสตาร์ชของข้าวเจ้าไทยแอมิโลสสูง	37
6	ความเป็นกึ่งก้านและการกระจายตัวสายโซ่ของสตาร์ชข้าว	42
7	สมบัติทางกลของฟิล์มสตาร์ชข้าว	44
8	ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างสตาร์ชข้าวแอมิโลสสูง และสมบัติเชิงความร้อนของสตาร์ชข้าว	46
9	ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างละเอียดของสตาร์ชข้าวเจ้าแอมิโลสสูงกับสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ช	47
10	ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างละเอียดของสตาร์ชข้าวเจ้าแอมิโลสสูงกับสมบัติทางกลของสตาร์ชฟิล์ม	48
11	ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงเคมีฟิสิกส์ของสตาร์ชข้าวเจ้าแอมิโลสสูงกับสมบัติทางกลของสตาร์ชฟิล์ม	49

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 โครงสร้างของแอมิโลส และแอมิโลเพกทิน	7
2 รูปแบบ cluster model ของแอมิโลเพกทิน	12
3 โครงสร้างของแอมิโลเพกทิน (A) การแบ่งสายโซ่ของแอมิโลเพกทิน (B) ลักษณะการเรียงผลึกแบบ semi-crystalline (C) การจัดเรียงตัวของโมเลกุลแอมิโลเพกทิน (D) เกิดยวคู่ (double helix) ของแอมิโลส และแอมิโลเพกทิน	12
4 รูปแบบของลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชข้าวไทย (1) ค่าอุณหภูมิเจลลิตีในเซชันต่ำ (2) ปานกลาง และ (3) สูง	35
5 การกระจายตัวสายโซ่ของสตาร์ชข้าวแอมิโลสสูงย่อยด้วยเอนไซม์ไอโซแอมิเลส	40
6 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชที่เหมาะสมสำหรับผลิตฟิล์มยืดตัวได้ดี	50
ภาพผนวกที่	
ข1 ค่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันและเอนทาลปีสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์เจียงพัทลุง	79
ข2 ค่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันและเอนทาลปีสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์แก่นจันทร์	80
ข3 ค่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันและเอนทาลปีสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90	81
ข4 ค่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันและเอนทาลปีสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ปทุมธานี 60	82
ข5 ค่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันและเอนทาลปีสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 1	83
ข6 ค่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันและเอนทาลปีสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ปราชญ์บุรี 1	84
ข7 ค่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันและเอนทาลปีสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาท 1	85

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

AGU	=	หน่วยกลูโคส (anhydrous glucose unit)
AM	=	แอมิโลส (amylose)
AP	=	แอมิโลเพกทิน (amylopectin)
CLn	=	ความยาวสายโซ่เฉลี่ย (average chain length)
DPn	=	ระดับขั้นพอลิเมอร์ไรเซชันเฉลี่ย (degrees of polymerization)
DSC	=	เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimetry)
ECL	=	ความยาวสายโซ่ภายนอก (external chain length)
GPC	=	โครมาโทกราฟีแบบแยกผ่านเจล (gel permeation chromatography)
ΔH	=	เอนทัลปี (enthalpy)
HPAEC	=	โครมาโทกราฟีแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ (high performance anion exchange chromatography)
ICL	=	ความยาวสายโซ่ภายใน (internal chain length)
PAD	=	เครื่องตรวจวัดชนิด pulse amperometric (pulse amperometric detection)
RVA	=	เครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว (rapid visco analyser)
SEC	=	โครมาโทกราฟีแบบแยกตามขนาด (size exclusion chromatography)
SP	=	สมบัติการพองตัว (swelling power)
To	=	อุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลลิตีไนเซชัน (onset gelatinization temperature)
Tp	=	อุณหภูมิการเกิดเจลลิตีไนเซชันสูงสุด (peak gelatinization temperature)
Tc	=	อุณหภูมิสุดท้ายการเกิดเจลลิตีไนเซชัน (conclusion gelatinization temperature)

ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างละเอียดของสตาร์ชข้าวแอมิโลสสูง และสมบัติทางกลของสตาร์ชฟิล์ม

Relationship between Fine Structure of High Amylose Rice Starch and Mechanical Properties of Their Films

คำนำ

ข้าวจัดเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญของประเทศไทย เพราะนอกจากจะเป็นพืชที่คนไทยบริโภคเป็นอาหารหลักแล้ว ยังเป็นพืชที่ประเทศไทยมีการผลิตและการส่งออก โดยข้อมูลจากสำนักเศรษฐกิจการเกษตรคาดการณ์ว่าในปี 2549/2550 ไทยมีการผลิตข้าวเป็นอันดับที่ 6 ของโลก คิดเป็นจำนวน 19.62 ล้านตัน จาก 415.02 ล้านตันทั่วโลก และมีการส่งออกข้าวเป็นอันดับที่ 1 ของโลกโดยส่งออกข้าวได้ทั้งหมด 7.5 ล้านตัน มูลค่า 108,393 ล้านบาท (วริพร, 2550) จุดเด่นอีกประการหนึ่งของประเทศไทยที่เกี่ยวข้องกับข้าวคือ ความหลากหลายของพันธุ์ข้าว ในปัจจุบันกรมวิชาการเกษตรมีรายชื่อข้าวไทยที่แนะนำสำหรับการเพาะปลูกอยู่ประมาณ 75 สายพันธุ์ และจำนวนรายชื่อข้าวที่ปลูกในแต่ละภูมิภาคอีกประมาณ 20 สายพันธุ์ อย่างไรก็ตามการนำข้าวไทยมาใช้ประโยชน์นอกเหนือจากในรูปของการบริโภคแบบข้าวเต็มเมล็ดกลับมีอัตราที่ต่ำมาก โดยเมื่อคิดเทียบร้อยละการแปรรูปข้าวเป็นผลิตภัณฑ์อื่น จะพบว่ามีส่วนการแปรรูปเป็นอาหารเส้น (ร้อยละ 5 ของข้าวที่ผลิตทั้งหมด) ทั้งที่จริงแล้วน่าจะมีการใช้ประโยชน์จากข้าวในรูปอื่นที่สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับข้าวได้มากกว่าผลิตภัณฑ์ข้าวที่มีอยู่ในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าวแอมิโลสสูง เพราะนอกจากจะเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตอาหารเส้นแล้ว ยังเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพในการผลิตเป็นฟิล์มบริโภคได้ (edible film) หรือเป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกชีวฐาน (biobased-polymer) ที่มีราคาสูงเป็น 10 เท่า ของข้าวเต็มเมล็ด หรืออาหารเส้น ซึ่งการผลิตฟิล์มบริโภคได้จากข้าว จะต้องใช้วัตถุดิบคือสตาร์ชข้าวซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีหลักของข้าว (ประมาณร้อยละ 90 โดยน้ำหนักแห้งของเนื้อเมล็ดของข้าว) (Fitzgerald, 2004)

การพัฒนาผลิตภัณฑ์จากพอลิเมอร์ธรรมชาติ ให้มีสมบัติเชิงหน้าที่และการนำไปใช้ประโยชน์ตามต้องการได้นั้น ต้องมีความเข้าใจถึงองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ สูตรโครงสร้าง ลักษณะการจัดเรียงตัว โครงสร้างของสารตั้งแต่วัตถุดิบโมเลกุลถึงการจัดเรียงตัวระดับโครงสร้างขนาดเล็ก (microstructure) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพอลิเมอร์และสารเติมแต่ง รวมถึงการเปลี่ยนแปลง

ของการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ระหว่างกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์นั้น จากการสำรวจเอกสารพบว่า โดยทั่วไปแล้วงานวิจัยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับสตาร์ชข้าวมุงเน้น การวิเคราะห์องค์ประกอบของสตาร์ช และคุณภาพของผลิตภัณฑ์เมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อน และไม่มีข้อมูลมากนักสำหรับงานวิจัยด้าน โครงสร้างละเอียดของสตาร์ชข้าวแอมิโลสสูงของไทย นอกจากนี้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างละเอียดของสตาร์ชข้าวเจ้ากับสมบัติของผลิตภัณฑ์มีน้อยมาก งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาข้อมูลพื้นฐานของสตาร์ชข้าวไทยที่มีแอมิโลสสูง และหาความสัมพันธ์เบื้องต้นระหว่างโครงสร้างละเอียดและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ช และสมบัติเชิงกลของฟิล์มสตาร์ช เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้เลือกชนิดของสตาร์ชข้าวเจ้าที่มีความเหมาะสมต่อการผลิตฟิล์มที่รับประทานได้ (edible film) ทำให้ได้ฟิล์มซึ่งขึ้นรูปได้ง่าย, บาง, ทนทานต่อแรงดึง, สามารถรับประทานได้, ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม และมีสมบัติที่ดีในการป้องกันผลิตภัณฑ์

วัตถุประสงค์

1. วิเคราะห์โครงสร้างละเอียด, สมบัติทางเคมี และ สมบัติทางเคมีฟิสิกส์ ของสตาร์ชข้าวไทยแอมิโลสสูงอย่างน้อย 7 สายพันธุ์
2. ผลิตฟิล์มจากสตาร์ชข้าวดังกล่าว และตรวจสอบสมบัติทางกลของฟิล์มนั้น
3. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง โครงสร้างละเอียด, สมบัติทางเคมีและสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ ของสตาร์ชข้าวและสมบัติทางกลของฟิล์มสตาร์ช

การตรวจเอกสาร

1. ข้าว

ข้าว (*Oryza sativa* L.) เป็นพืชที่มนุษย์รู้จักและเป็นอาหารหลักของประชากรเอเชีย มาเป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 5,000 ปี สามารถปลูกได้ในทุกทวีปยกเว้นทวีปแอนตาร์กติกา ข้าวแบ่งออกเป็นทั้งหมด 23 ชนิด (species) แต่ที่มนุษย์นิยมปลูกเพื่อบริโภคมีเพียง 2 species คือ *O. sativa* L. และ *O. glaberrima* Steud. โดยข้าวในกลุ่ม *O. glaberrima* Steud. มีการปลูกเฉพาะที่ทวีปแอฟริกา เท่านั้น สำหรับข้าวกลุ่ม *O. sativa* L. ที่ปัจจุบันนิยมปลูกทั่วโลก สามารถแบ่งออกได้อีกเป็น 3 ชนิดย่อย (sub-species) คือ อินดิกา (*Indica*), จาปอนิกา (*Japonica*) และจาวานิกา (*Javanica*) ข้าวในตระกูลอินดิกาเป็นกลุ่มข้าวที่มีอัตราส่วนของเนื้อที่การเพาะปลูกสูงที่สุดคือประมาณร้อยละ 80 ของพื้นที่เพาะปลูกข้าวทั้งหมดของโลก (Juliano, 1985) ลักษณะเฉพาะของข้าวอินดิกาคือเมล็ดมีรูปร่างเรียวยาว (ความยาวเท่ากับ 6.2 – 7.1 มิลลิเมตร และความกว้างเท่ากับ 1.9 – 2.3 มิลลิเมตร) ใช้ปริมาณน้ำมากในการหุงสุก เนื่องจากปริมาณการร่อนน้ำน้อย เมื่อหุงสุกจะได้ข้าวสวยชนิดแข็ง สำหรับข้าวจาปอนิกามีลักษณะเฉพาะคือ เมล็ดสั้นและป้อม (ความยาวเท่ากับ 5.0 – 5.8 มิลลิเมตร และความกว้างเท่ากับ 2.9 – 3.1 มิลลิเมตร) ใช้ปริมาณน้ำต่ำกว่าข้าวอินดิกาในการหุงสุก และข้าวที่หุงสุกแล้ว จะได้ข้าวที่มีความนิ่ม (อรอนพ, 2537) สำหรับข้าวจาวานิกาเป็นข้าวที่มีลักษณะระหว่างข้าวจาปอนิกา และข้าวอินดิกา ปลูกทั่วไปบริเวณเส้นศูนย์สูตร เช่น อินโดนีเซีย และพม่า เป็นต้น (อรอนงค์, 2547)

ข้าวยังสามารถแบ่งประเภทได้ตามปริมาณแอมิโลส และอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันของสตาร์ชข้าว การแบ่งประเภทข้าวตามปริมาณแอมิโลส สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภท คือ (1) ข้าวเหนียว มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 0-2, (2) ข้าวเจ้าแอมิโลสดำมาก มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 5-10, (3) ข้าวเจ้าแอมิโลสดำ มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 10-20 (4) ข้าวเจ้าแอมิโลสปานกลาง มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 20-25 และ (5) ข้าวเจ้าแอมิโลสสูง มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 25-33 (Juliano, 1998) แต่ละชนิดแตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดและสายพันธุ์ แหล่งเพาะปลูก และฤดูกาลที่ทำการเพาะปลูก สำหรับการแบ่งตามอุณหภูมิเจลาตินในเซชัน สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ ข้าวที่มีอุณหภูมิเจลาตินในเซชันต่ำ มีค่าอุณหภูมิที่ทำให้สตาร์ชเกิดเจลาตินในเซชันสูงสุด (peak, T_p) มีค่าต่ำกว่า 70 องศาเซลเซียส, ข้าวที่มีอุณหภูมิเจลาตินในเซชันปานกลาง มีค่า T_p ระหว่าง 70 - 74 องศาเซลเซียส และข้าวที่มีอุณหภูมิเจลาตินในเซชันสูง มีค่า T_p มากกว่า 74 องศาเซลเซียส (Juliano, 1998)

การใช้ประโยชน์จากข้าว นอกเหนือจากการบริโภคในรูปข้าวหุงสุกแล้ว โดยทั่วไปจะเป็นกลุ่มผลิตภัณฑ์อาหารจากแป้งข้าว (rice flour) สำหรับการใช้ประโยชน์ของข้าว จากกลุ่มคาร์โบไฮเดรตหลักในข้าวหรือ สตาร์ชข้าว (rice starch) มาใช้ประโยชน์ ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นกลุ่มผลิตภัณฑ์อาหารเด็ก กลุ่มผลิตภัณฑ์อาหารปลอดกลูเตน (gluten-free) กลุ่มผลิตภัณฑ์ที่เป็นส่วนประกอบของอาหาร และกลุ่มอุตสาหกรรมเภสัชกรรม (Kennedy and Burlingame, 2003)

2. องค์ประกอบทางเคมีของข้าวและสตาร์ชข้าว

2.1 องค์ประกอบทางเคมีของข้าว

เมื่อนำข้าวขาวเต็มเมล็ดมาไม่แปรรูปเป็นแป้งข้าว พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมี คือ โปรตีน (5.8 – 6.4 %) ไขมัน (0.6 - 0.8 %) เถ้า (0.6 – 0.9 %) เยื่อใย (0.3 %) และคาร์โบไฮเดรต (ประมาณ 77- 80 %) (Zhou *et al.*, 2002) โปรตีนของข้าวจัดเป็น 4 ประเภทคือ โปรตีนที่ละลายน้ำ หรือ แอลบูมิน (albumin) ประมาณ 9.7 – 14.2 % ของโปรตีนทั้งหมด, โปรตีนที่ละลายในเกลือ หรือ โกลบูลิน (globulin) ประมาณ 13.5 – 18.9 %, โปรตีนที่ละลายในแอลกอฮอล์ หรือ โปรลามิน (prolamin) หรือ ออริซานิน (oryzanin) ประมาณ 3.0 – 5.4 % และโปรตีนที่ละลายในสารละลายเบส หรือ กลูเตลิน (glutelin) 63.8 – 73.4 % (Champagne, 1996) สำหรับลิพิดประกอบด้วย ไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) ร้อยละ 55 - 83, กรดไขมันอิสระ (free fatty acid) ร้อยละ 3 - 29, กลูโคลิพิด (glucolipids) ร้อยละ 2 - 4, ฟอสโฟลิพิด (phospholipids) ร้อยละ 7 - 13 (Morrison, 1995)

2.2 ขนาดอนุภาคของสตาร์ชข้าว

พืชสะสมสตาร์ชในรูปแกรนูล เพื่อเป็นแหล่งสะสมอาหารของพืช แกรนูลข้าวมีขนาดเล็ก (3 – 8 ไมครอน) พื้นผิวเรียบ มีรูปร่างเหลี่ยมหลายเหลี่ยม (polygonal) และขนาดอนุภาคของสตาร์ชแกรนูลมีความใกล้เคียงกัน (single modal distribution) ลักษณะเฉพาะของแกรนูลข้าวประการหนึ่งคือเป็น compound granules โดยแกรนูลข้าวประมาณ 20 – 60 แกรนูล เกาะกันเป็นกลุ่มแน่นอยู่ภายในเอมิโลพลาสต์ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 150 ไมครอน (Sodhi and Singh, 2003) มีรายงานว่าสตาร์ชข้าวเจ้าและข้าวเหนียวมีขนาดแกรนูลต่างกันเล็กน้อย โดยขนาดของสตาร์ชแกรนูลข้าวเจ้าและข้าวเหนียวที่ปลูกในอินเดียจะอยู่ในช่วง 2.4 – 5.4 ไมครอน และ 4.9 – 5.7 ไมครอน (Qi *et al.*, 2003) ตามลำดับ นอกจากนี้แกรนูลของสตาร์ชข้าวที่มีการดัดแปลงทาง

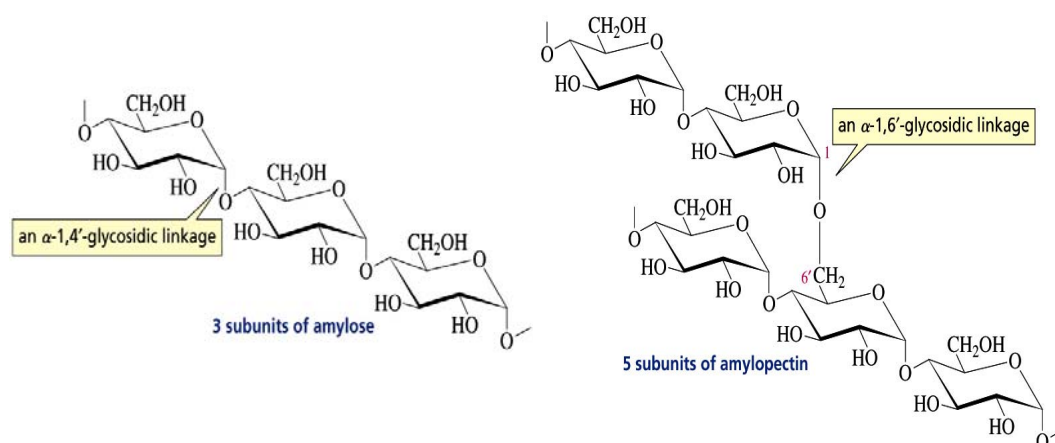
พันธุกรรม เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscopy-SEM) เช่น กลุ่มข้าวซูการ์ (*sugary*) จะมีผิวที่ไม่เรียบ (rough) และรูปร่างต่างไปจากเดิม โดย แกรนูลบาง แกรนูลจะเกาะกันแบบหลวม (loosely pack) และจับกันเป็นกลุ่ม (cluster) ขณะที่แกรนูลบางตัว จะมีรูพรุนและมีรอยแตก (Wong *et al.*, 2003)

2.3 องค์ประกอบของสตาร์ชแกรนูล

สตาร์ชข้าว (rice starch) เป็นคาร์โบไฮเดรตหลักของข้าว (ประมาณ 99 %) องค์ประกอบของสตาร์ช ประกอบด้วย กลูโคสพอลิเมอร์ (มากกว่า 98 %) โปรตีน (น้อยกว่า 0.5 %) และ ลิพิด (น้อยกว่า 1 %) (Champagne, 1996) โดยโปรตีนที่พบในสตาร์ช คือ กลุ่มโปรตีน integral ซึ่งเกิดจาก waxy gene เรียกว่า waxy (Wx) protein โดย waxy (Wx) protein คือ granule-bound starch synthase (GBSS) ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างแอมิโลส และจะไม่พบสารนี้ในกลุ่มของ waxy starch (Han and Hamaker, 2002) สำหรับองค์ประกอบของลิพิดที่พบในสตาร์ชแกรนูลของ ข้าวเหนียว คือ กรดไขมันอิสระร้อยละ 100 สำหรับสตาร์ชแกรนูลของข้าวเจ้าประกอบด้วย ไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละ 0.3 กรดไขมันอิสระ ร้อยละ 31.2 กลูโคลิพิด ร้อยละ 3.2 ฟอสโฟลิพิด ร้อยละ 61.5 (Chung and Ohm, 2000) นอกจากนี้ยังมีพวกแร่ธาตุ เช่น แคลเซียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และโซเดียมซึ่งอยู่ในรูปไอออนิก (ionic form) (Vandeputte and Delcours, 2004)

2.4 โมเลกุลของสตาร์ช

สตาร์ชเป็นโพลีเมอร์ที่มี พอลิ-แอลฟา-กลูโคไพราโนส (poly- α -glucopyranose) เป็นโครงสร้างหลัก โมเลกุลของสตาร์ชแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แอมิโลส (AM) และแอมิโลเพกทิน (AP) (ภาพที่ 1) โดยอัตราส่วนระหว่าง AM และ AP ของสตาร์ชทั่วไป จะอยู่ประมาณ 25:75 โดยน้ำหนัก (Bao and Bergman, 2004) AM และ AP จะจัดเรียงตัวกันแน่นจนเป็นเม็ดสตาร์ชหรือสตาร์ชแกรนูล โดยมีโครงสร้างลักษณะเป็นรัศมีจากจุดกลางแบบกิ่งผลึก และมีบางส่วนที่อยู่ร่วมกับลิพิด (อรอนงค์, 2547) อัตราส่วนระหว่าง AM และ AP ที่แตกต่างกัน และ ลักษณะรายละเอียดของพอลิเมอร์ทั้งสองที่แตกต่างกัน เช่น ความเป็นกิ่งของ AP, ความยาวของสาย AM ทำให้สมบัติของสตาร์ชข้าวแต่ละพันธุ์มีความแตกต่างกัน (Juliano, 1998)



ภาพที่ 1 โครงสร้างของแอมิโลส และแอมิโลเพกทิน

ที่มา: Bruice (2004)

2.4.1 แอมิโลส (AM) เป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วย poly- α -glucopyranose ต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะ α -1,4 ไกลโคซิดิก มีกิ่งที่เป็น poly- α -glucopyranose เช่นกัน ต่อกับโครงสร้างหลัก (backbone structure) ด้วยพันธะ α -1,6 ไกลโคซิดิก เมื่อนำ AM ไปละลายน้ำสายโซ่ AM มีลักษณะการจัดตัวเป็นเกลียว (helical conformation) ประกอบด้วยแอนไฮโดร-กลูโคส 6 หน่วยต่อหนึ่งรอบเกลียว หมู่ไฮดรอกซิลของกลูโคสจะอยู่ทางด้านผิวนอกของเกลียว ในขณะที่ภายในเกลียวประกอบด้วยส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ทำให้สารที่ไม่ชอบน้ำสามารถจับด้านในของ AM ได้โดยยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals forces) ดังเช่นเมื่อมีการเติมสารละลายไอโอดีนในสตาร์ช ไอโอดีนจะเกิดแรงยึดเกาะกับส่วนที่ไม่ชอบน้ำและเกิดสีน้ำเงินขึ้น นอกจากนี้ยังมีสารอื่นที่สามารถจับกับ AM ได้ เช่น กรดไขมัน หรือ sodium dodecyl sulfate (SDS) การที่ AM สามารถจับกับไอโอดีนแล้วเกิดสีทำให้มีการนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณ AM จากสตาร์ชได้ (Bao and Bergman, 2004)

จากการสำรวจเอกสารพบที่ยังไม่มีงานวิจัยที่รายงานโครงสร้างละเอียดของ AM จากข้าวอย่างสมบูรณ์ (Bao and Bergman, 2004) Takeda *et al.* (1986) รายงานว่า AM ของข้าวมีความยาวโมเลกุลเฉลี่ย ($\overline{DP}_n$) ประมาณ 920 – 1,110 AGU คิดเป็นน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ($\overline{M}_n$) ($1.5 - 1.8 \times 10^5$ กรัมต่อโมล), ค่าความยาวสายโซ่เฉลี่ย (average chain length, $\overline{CL}_n$) และร้อยละปีตาแอมิโลไลซิส (% beta-amylolysis) ของ AM ของข้าวมีค่าเป็น 250 – 370 AGU และร้อยละ 73 – 84 ตามลำดับ Hizukuri *et al.* (1989) รายงานว่า AM ของข้าว สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท

จากเทคนิค size exclusion chromatography (SEC) คือ AM ที่มีลักษณะโมเลกุลต่อกันเป็นสายยาวตรงล้วน และ AM ที่โมเลกุลมีความเป็นกิ่งมาก โดย AM ที่เป็นสายยาวตรง มีค่า $\overline{DP}_n$ ประมาณ 700 – 900 AGU ซึ่งมีขนาดโมเลกุลเล็กกว่า AM ที่มีความเป็นกิ่ง ($\overline{DP}_n$ ประมาณ 1,100 – 1,700 AGU)

Lii *et al.* (1998) ทำการวิเคราะห์ขนาดโมเลกุล AM ของข้าวด้วยเทคนิค SEC พบว่า AM มี $\overline{DP}_n$ เป็น 987 – 1,225 AGU และมี $\overline{CL}_n$ เป็น 276 – 430 AGU โคโรนาโตแกรมของ AM แสดงให้เห็นว่าขนาดโมเลกุล AM สามารถแบ่งย่อยออกเป็น 2 ส่วน คือ F_1 (AM ที่มีมวลโมเลกุลใหญ่) และ F_2 (AM ที่มีมวลโมเลกุลเล็ก) AM ในกลุ่ม F_1 มีค่า $\overline{DP}_n$ 1,472 – 2,011 AGU และ $\overline{CL}_n$ 247 – 385 AGU และในกลุ่ม F_2 มีค่า $\overline{DP}_n$ 353 – 441 AGU และ $\overline{CL}_n$ 152 – 309 AGU ขณะที่ Hizukuri (1993) แสดงค่า $\overline{DP}_n$ และ $\overline{CL}_n$ ของข้าวไว้โดย AM ในกลุ่ม F_1 เท่ากับ 2,230 และ 330 AGU กลุ่ม F_2 เท่ากับ 1,670 และ 520 AGU และกลุ่ม F_3 เท่ากับ 410 และ 295 AGU ตามลำดับจากการสำรวจเอกสารข้างต้นจะเห็นว่าขนาดโมเลกุล AM ของข้าว อาจมีความแตกต่างกันได้บ้าง ทั้งนี้เป็นเพราะมีหลายปัจจัยที่มีผลต่อค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ เช่น พันธุ์ข้าว, สภาวะแวดล้อมในการปลูกข้าว, รวมถึงเทคนิควิธีการวิเคราะห์

2.4.2 แอมิโลเพกทิน (AP) เป็นพอลิเมอร์ที่ยังคงมี poly- α -glucopyranose เป็นทั้งโครงสร้างหลัก และโครงสร้างกิ่ง เช่นเดียวกับ AM แต่มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่กว่า ($\overline{DP}_n$ ประมาณ 5,000 – 15,000 AGU) และมีความเป็นกิ่งมากกว่า AM ($\overline{CL}_n$ ประมาณ 220 – 1,050 AGU) (Hizukuri *et al.*, 1989) (ภาพที่ 1) Takeda *et al.* (2003) แบ่งกลุ่ม AP ของสตาร์ชโดยใช้เทคนิค gel permeation chromatography (GPC) และวัดขนาดของ AP ของข้าว, ข้าวเหนียว, ข้าวโพด, ข้าวโพดข้าวเหนียว และมันฝรั่ง โดยวิธี fluorescent labeling หลังจากผ่าน SEC พบว่า AP ของสตาร์ชจากพืชต่างชนิดกันสามารถแยกออกได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้ (1) $\overline{DP}_n$ ขนาดใหญ่ (13,400 – 26,500 AGU) (2) $\overline{DP}_n$ ขนาดกลาง (4,400 – 8,400 AGU) และ (3) $\overline{DP}_n$ ขนาดเล็ก (700 – 1,200 AGU) นอกจากนี้ ปริมาณ AM, sub-species ของพันธุ์พืช และสิ่งแวดล้อมยังเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อขนาดโมเลกุลของ AP ตัวอย่าง Fishman *et al.* (1996) รายงานว่าน้ำหนักโมเลกุลของ AP ลดลง เมื่อปริมาณ AM ของสตาร์ชข้าวโพดสูงขึ้น นอกจากนี้ Yoo and Jane (2002) ได้ใช้เครื่องมือ high-performance size-exclusion chromatography (HPSEC) ร่วมกับชุดตรวจวัดแบบ multi-angle laser-light scattering (MALLS) และ refractive index (RI) ในการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของ AP ของข้าว พบว่า AP ของข้าวเจ้ามีน้ำหนักโมเลกุล (M_w) 2.7×10^9 ดาลตัน และต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ M_w ของ AP ข้าวเหนียว (5.7×10^9 ดาลตัน) ซึ่ง M_w ของ AP ของข้าวเหนียว มีค่าใกล้เคียงกับ AP ของข้าวโพด ข้าวสาลี และข้าวบาร์เลย์อย่างมีนัยสำคัญ

ชนิดย่อยของข้าว (sub-species) เป็นปัจจัยอีกประการที่มีผลต่อลักษณะ โมเลกุลของ AP ของข้าว Lu *et al.* (1997) รายงานว่าเมื่อทำการวิเคราะห์ค่า $\overline{DPn}$ โดยใช้วิธีของ Park-Johnson AP ของข้าวเจ้า และข้าวเหนียวในประเทศไทยได้หวั่นมีค่า $\overline{DPn}$ อยู่ในช่วง 2,700 – 12,000 AGU และมี $\overline{CLn}$ 15.7 – 22.1 AGU โดยกลุ่มข้าวเหนียวชนิดย่อย อินดิกา มีค่า $\overline{DPn}$ และ $\overline{CLn}$ ของ AP เป็น 7,700 – 8,300 AGU และ 19.1 – 19.8 AGU ตามลำดับ ซึ่งต่างจาก AP ของกลุ่มข้าวเหนียวชนิดย่อยจาปอนิกาที่มีค่า ($\overline{DPn}$ 9,100 – 9,900 AGU และ $\overline{CLn}$ 17.4 – 17.6 AGU)

ลักษณะ โมเลกุล AP ของข้าวเจ้า ยังคงได้รับอิทธิพลจากทั้งปริมาณ AM และ ชนิดของ sub-species โดยกลุ่มข้าวเจ้า sub-species อินดิกาที่มีปริมาณ AM สูง (ปริมาณ AM มากกว่า 25 %) AP จะประกอบด้วยค่า $\overline{DPn}$ 2,700 – 2,900 AGU และ $\overline{CLn}$ 20.2 – 22.1 AGU ขณะที่ AP จากกลุ่มข้าวย่อยเดียวกัน แต่มีปริมาณ AM ต่ำ (ปริมาณ AM 10 – 20 %) จะมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่า แต่มีความยาวกิ่งต่ำกว่า ($\overline{DPn}$ 6,400 – 7,900 AGU และ $\overline{CLn}$ 18.5 – 18.8 AGU) และสำหรับข้าวเจ้า sub-species จาปอนิกาที่มีปริมาณ AM ต่ำ (ปริมาณ AM 14 – 18 %) มีขนาดโมเลกุล AP ใหญ่ที่สุด และมีค่าความยาวกิ่งเฉลี่ยโดยเฉลี่ยสั้นที่สุด ($\overline{DPn}$ 7,300 – 12,000 AGU และ $\overline{CLn}$ 15.4 – 17.5 AGU ตามลำดับ) (Lu *et al.*, 1997)

เนื่องจาก AP เป็นพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่ และมีความเป็นกิ่งสูง การศึกษา ลักษณะความเป็นกิ่งของ AP จึงจำเป็นต้องมีการจำแนกประเภทของลักษณะกิ่งของ AP โดย (1986) ได้เสนอ cluster model (ภาพที่ 2) ในการอธิบายโครงสร้างของ AP โดยแบ่งสายโซ่ (chain) ของ AP ออกเป็น 3 แบบ คือ A chain, B chain และ C chain ซึ่ง AP มีการกระจายของสายโซ่แบบ polymodal ประกอบด้วยสายโซ่ A ซึ่งเป็นสายโซ่ที่เชื่อมต่อกับสายโซ่อื่นที่ตำแหน่งเดียว และไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายโซ่ชนิดนี้ ($\overline{CL}$ 12 - 16), สายโซ่ B เป็นสายโซ่ที่มีสายโซ่ A หรือสายโซ่ B อื่นต่อเป็นกิ่งอยู่บนสายโซ่ ซึ่งสายโซ่ B สามารถแบ่งออกได้อีก $B_1 - B_4$ ตามการเชื่อมระหว่าง cluster โดย B_4 เชื่อมต่อ 4 cluster ($\overline{CL}$ 104 - 140), B_3 เชื่อมต่อ 3 cluster ($\overline{CL}$ 69 - 75), B_2 เชื่อมต่อ 2 cluster ($\overline{CL}$ 42 - 48) และ B_1 เชื่อมต่อ 1 cluster ($\overline{CL}$ 20 - 24) สำหรับสายโซ่ C มีสายโซ่ A หรือสายโซ่ B อื่น ต่อเป็นกิ่งอยู่บนสายโซ่ และมีหัวสายโซ่เป็น reducing end โดยสายโซ่ C มีความยาวระหว่าง 10 – 130 AGU โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 40 AGU (Hanashiro *et al.*, 2002) (ภาพที่ 3)

Lu *et al.* (1997) พบการจัดเรียงของแอมิโลเพกทินของข้าวเจ้า และข้าวเหนียว 14 พันธุ์ ยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบเมื่อใช้เอนไซม์ไอโซแอมิเลส ในการตัดกิ่งของ AP ของข้าวเจ้า และข้าวเหนียวแล้วแยกขนาดโมเลกุล AP ออกจากกันโดยใช้เทคนิค SEC โดย แบบที่ 1

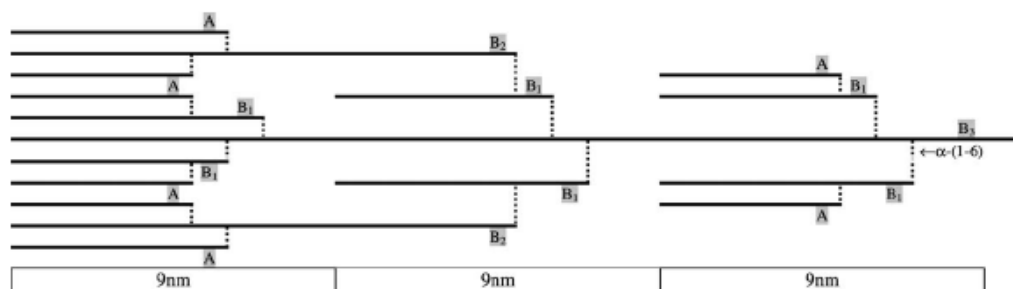
ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ประกอบด้วย $A+B_1$ ($\overline{DP}_n$ 10 - 15) ส่วนที่ประกอบด้วย B_2 ($\overline{DP}_n$ 40 - 44) และส่วนที่ประกอบด้วย B_3 ($\overline{DP}_n > 100$) และ แบบที่ 2 ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนของ $A+B_1$ ($\overline{DP}_n$ 10 - 15) และ B_2 ($\overline{DP}_n$ 40 - 44) โดยใช้วิธีการวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ทั้งหมดวัดค่า $\overline{DP}_n$ ซึ่งได้ค่าแตกต่างจาก Villareal *et al.* (1993) ใช้เอนไซม์ไอโซแอมิเลสในการตัดกิ่งของ AP ของข้าวเจ้า และข้าวเหนียวแล้วแยกขนาดโมเลกุล AP ออกจากกันโดยใช้เทคนิค SEC และใช้ตัววัดการหักเหแสง วิเคราะห์ค่า DP_w พบว่า AP ดังกล่าว แยกออกได้เป็น 3 ประเภท คือ 1.ส่วนที่ประกอบด้วย $A+B_1$ (DP_w 16 - 18), 2.ส่วนที่ประกอบด้วย B_2 (DP_w 47 - 51) และ 3.ส่วนที่ประกอบด้วย B_3 (DP_w 150 - 200) นอกจากนี้ข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงบางพันธุ์จะมีส่วนของ B_4 (DP_w 560) เพิ่มเติมคิดเป็นน้ำหนักประมาณร้อยละ 1

ลักษณะการกระจายตัวของสายโซ่ AP สามารถใช้เครื่อง high performance anion exchange chromatography (HPAEC) ประกอบกับ pulsed amperometric detector (PAD) วิเคราะห์ได้ โดยวิธีการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของสายโซ่ สามารถกระทำควบคู่กันไปได้ไประหว่าง เทคนิค HPAEC-PAD และเทคนิคการวิเคราะห์อื่นๆ เช่น การใช้ HPAEC-PAD ร่วมกับการใช้เอนไซม์คอลลิมัน (Wong and Jane, 1997), HPAEC ร่วมกับ capillary electrophoresis (Nakamura *et al.*, 2002) HPAEC-PAD ร่วมกับ HPLC-GPC และ/หรือ MALLS-RI (Chen and Bergman, 2007) และผลจากวิธีการวิเคราะห์ที่กล่าวมา สามารถจำแนกรูปแบบการกระจายตัวของสายโซ่ AP ได้ 4 รูปแบบ กล่าวคือ

1.กลุ่มของ Hanashiro *et al.* (1996) แบ่งกลุ่มการกระจายตัวของสายโซ่ AP จากสตาร์ช 11 ชนิด โดยใช้ร้อยละของพื้นที่ของแต่ละค่าความยาวสายโซ่ ($\overline{CL}$ 6 - $\overline{CL}$ 52) ของ AP จากพืชแต่ละชนิดหักลบกับร้อยละของพื้นที่ของแต่ละความยาวสายโซ่ ($\overline{CL}$ 6 - $\overline{CL}$ 52) ของ AP ของ arrowhead และพบว่าสตาร์ชแต่ละชนิดมีลักษณะการกระจายตัวของสายโซ่ที่มีลักษณะเฉพาะตัว และสามารถแบ่งช่วงการกระจายตัวของสายโซ่ออกเป็น 4 กลุ่ม คือ $\overline{DP}_n$ 6 - 12 $\overline{DP}_n$ 12 - 24 $\overline{DP}_n$ 25 - 36 และ $\overline{DP}_n$ มากกว่า 37 โดยการแบ่งการกระจายตัวดังกล่าวได้รับความนิยม และมีการนำไปใช้ในงานวิจัยอื่น ดังเช่น งานวิจัยของ Jane *et al.* (1999) เป็นต้น 2.กลุ่มของ Vandeputte (2003a) แบ่งกลุ่มการกระจายตัวของสายโซ่ออกเป็น 6 กลุ่ม คือ $\overline{DP}_n$ 6 - 9 $\overline{DP}_n$ 10 - 11 $\overline{DP}_n$ 12 - 22 $\overline{DP}_n$ 23 - 24 $\overline{DP}_n$ 25 - 32 และ $\overline{DP}_n$ มากกว่า 32 เนื่องมาจากการพบความสัมพันธ์ทั้งเชิงบวกและลบระหว่างกลุ่มการกระจายตัวของสายโซ่ทั้ง 6 กลุ่ม และอุณหภูมิการเกิดเจลที่ไนซ์ และช่วงการเกิดเจลที่ไนซ์ 3.กลุ่มของ Noda *et al.* (2003) รายงานค่าการกระจายตัวของสายโซ่ AP โดยคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างช่วงสายโซ่สั้น ($\overline{DP}_n$ 6 - 12) กับสายโซ่ทั้งหมด ($\overline{DP}_n$ 6 - 30) ของ AP

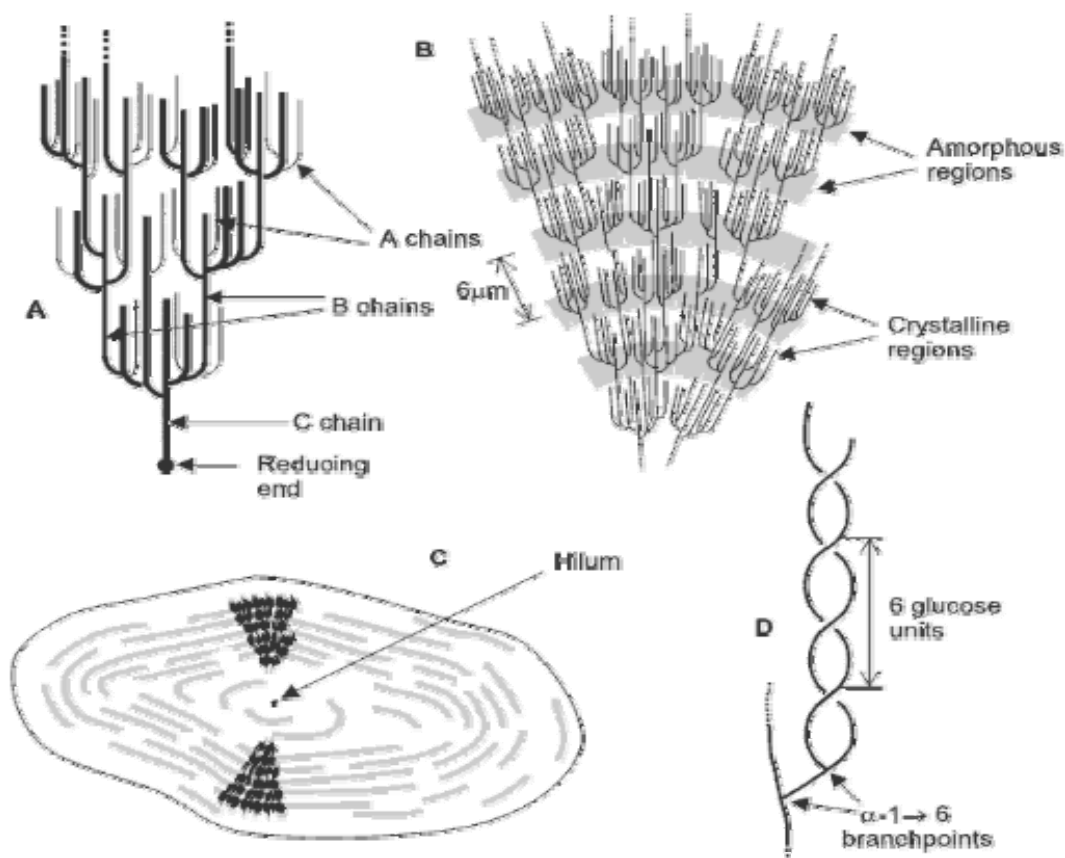
ข้าวเจ้าและข้าวเหนียว และ 4.กลุ่มของ Nakamura *et al.* (2002) ซึ่งทำการศึกษาโครงสร้างละเอียดของ AP จากข้าวในทวีปเอเชีย 129 พันธุ์ ได้เสนอให้แบ่งข้าวทั้งหมดออกเป็น 2 กลุ่ม คือ แบบสายโซ่ยาว (L-type) ซึ่งมีปริมาณส่วนที่มีค่า $\overline{DP}_n \leq 10$ น้อยกว่าแบบสายโซ่สั้น (S-type) ร้อยละ 20 แต่มีปริมาณส่วนที่มีค่า $\overline{DP}_n \leq 24$ มากกว่าสายโซ่สั้นร้อยละ 24

นอกจากนี้ผลของอุณหภูมิของพื้นที่เพาะปลูกยังมีผลต่อโครงสร้างของ AP โดย Suzuki *et al.* (2003) พบว่าอุณหภูมิระหว่างช่วงสร้างเมล็ดมีผลกระทบต่อการกระจายตัวของ AP โดยขณะที่อุณหภูมิต่ำส่วนสายโซ่สั้นจะเพิ่มมากขึ้น ในทางตรงข้ามส่วนสายโซ่ยาวจะลดลง



ภาพที่ 2 รูปแบบ cluster model ของแอมิโลเพกทิน

ที่มา: Tester *et al.* (2004)



ภาพที่ 3 โครงสร้างของแอมิโลเพกทิน

(A) การแบ่งสายโซ่ของแอมิโลเพกทิน (B) ลักษณะการเรียงผลึกแบบ semi-crystalline
(C) การจัดเรียงตัวของโมเลกุลแอมิโลเพกทิน (D) เกลียวคู่ (double helix) ของแอมิโลส
และแอมิโลเพกทิน

ที่มา: Chaplin (2006)

3. สมบัติการเกิดเจลและฟิล์มของแอมิโลส

สมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของ AM คือความสามารถในการเกิดเจล AM เป็นกลูโคสพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นสายยาวตรง ซึ่งเป็นลักษณะของพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดเจลได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่เป็นกิ่ง โดยเมื่อให้ความร้อนแก่ระบบที่มีน้ำเพียงพอ ที่ระดับอุณหภูมิเจลาติในเซชันหรือสูงกว่า เม็ดสตาร์จะบวมพอง และปลดปล่อย AM ออก เมื่อสารละลายเย็นลง โครงสร้างของ AM ประกอบด้วยสายโซ่ที่เป็นสายยาวตรงเป็นส่วนใหญ่ จะเกิดการสร้างโครงสร้างตาข่าย (continuous network) ระหว่างสายพอลิเมอร์ และเชื่อมต่อกันตรง junction zones ได้ ทำให้เกิดการเชื่อมโยง (cross-link) ของสายโซ่ เกิดเป็นโครงร่างตาข่าย 3 มิติ อุ่นน้ำไว้ภายในทำให้เกิดเป็นเจล (hydrogel) (Walter, 1998) ดังนั้นสตาร์ชที่มีปริมาณ AM สูงจะมีความสามารถในการเกิดเจลได้ดีกว่า สตาร์ชที่มีปริมาณ AM ต่ำ โดยโครงสร้างที่มีปริมาณ AM สูงจะให้เจลที่มีความแข็งแรงสูง เนื่องจากสายโซ่ของ AM ที่ยาวจะเกิดการเกี่ยวพันกันด้วยพันธะไฮโดรเจนเกิดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง ขณะที่ AP จะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น (flexibility) และการยืดตัว (elongation) ของเจล เนื่องจากลักษณะมวลโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่และมีกิ่งก้านมาก (Van Soest and Vliegenthart, 1997)

สมบัติอีกประการหนึ่งของ AM คือ ความสามารถในการเกิดฟิล์มได้ดี เนื่องจากฟิล์มเป็นเจลประเภทหนึ่ง ซึ่งอยู่ในกลุ่มของเจลที่เกิดจากการจัดน้ำภายในออกจากโครงสร้าง (xerogel) (Walter, 1998) เจลมีโครงสร้างเป็น 2 มิติ แทนที่จะเป็น โครงร่างตาข่ายแบบ 3 มิติเหมือนเจลอื่น ซึ่งสมบัติในการขึ้นฟิล์มดังกล่าวของ AM สามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ โดยการนำสตาร์ชที่มี AM สูงมาผลิตเป็นฟิล์มไบโอพอลิเมอร์ (biopolymer film) สามารถบริโภคได้หรือย่อยสลายทางชีวภาพได้โดยง่าย (Rindlav-Westling and Gatenholm, 2003)

กลไกในการเกิดฟิล์ม จะมีองค์ประกอบหลัก คือ พอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลสูง ซึ่งมีคุณสมบัติในการเกิดฟิล์ม ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ ตัวทำละลาย และสารเติมแต่งที่เติมเพื่อให้ปรับปรุงสมบัติของฟิล์มให้ดีขึ้น เมื่อนำองค์ประกอบมาทำให้ละลายและกระจายตัว แล้วแยกตัวทำละลายออก จะเกิดแรงยึดเหนี่ยว 2 ชนิด ได้แก่ แรงยึดเกาะ (cohesion) และแรงเกาะติด (adhesion) โดยแรงยึดเกาะเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อแรงยึดเกาะ ได้แก่ โครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีของพอลิเมอร์ที่สัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุล ความยาว และการกระจายตัวของกลุ่มที่มีขั้วในสายโซ่พอลิเมอร์ ระบบการละลาย และสภาวะที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม ดังเช่น การเตรียมฟิล์มด้วยสารละลายที่อุ่นและทำให้ฟิล์มแห้งด้วยอัตราการระเหยของตัวทำละลายที่เหมาะสม เป็นต้น ส่วนแรงเกาะติดจะเป็นแรงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์กับสารอื่นที่

เกี่ยวข้องในการเตรียมฟิล์ม เช่น พลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) เป็นต้น แรงยึดเหนี่ยวทั้ง 2 ชนิดจะมีผลต่อสมบัติต่างๆของฟิล์ม เช่น ความสามารถในการซึมผ่าน ความเปราะ ความยืดหยุ่น และความหนาแน่นของฟิล์ม เป็นต้น (Banker, 1966)

4. ฟิล์มที่รับประทานได้ (edible film)

มณฑาทิพย์ (2535) แสดงคำจำกัดความของฟิล์มที่รับประทานได้หมายถึง วัสดุแผ่นบางที่รับประทานได้ นำมาใช้กับอาหารด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การห่อหุ้ม (enrobing) การจุ่ม (dipping) การแปรง (brushing) หรือการพ่นฝอย (spraying) เพื่อกันมิให้ก๊าซ ไอระเหย และสารละลายเข้าออกจากอาหารได้

Krochta and Mulder-Johnston (1997) ได้ให้คำจำกัดความของฟิล์มบริโภคนได้ว่าเป็นวัสดุแผ่นบางที่รับประทานได้นำมาใช้กับอาหาร โดยการเคลือบ (coating), วาง (placed) ด้านบนหรือระหว่างส่วนประกอบของอาหาร ใช้เพื่อจุดประสงค์ในการป้องกันการสูญเสียความชื้น กลิ่นหอม (aroma) และกลิ่นรส (flavor) ป้องกันการเสื่อมเสียจากก๊าซออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และ/หรือช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทั้งหมด และคุณลักษณะเมื่อมีการสัมผัสกับอาหาร คุณลักษณะในการป้องกันการซึมผ่าน (barrier) ของฟิล์มบริโภคนได้ อาจมีการปรับปรุงให้ดีขึ้นจากการใช้เป็นฟิล์มแบบหลายชั้น (multilayer) ร่วมกับภาชนะพลาสติกที่มีหลายประกอบ (multicomponent plastic package) นอกจากนี้ลักษณะของฟิล์มที่ดีควรมีความบาง และทนทานต่อการดึงยืด

Gennadios and Weller (1990) กล่าวถึงข้อดีของฟิล์มที่รับประทานได้ที่เหนือกว่าฟิล์มพลาสติก คือ

1. บริโภคฟิล์มได้พร้อมกับผลิตภัณฑ์ที่บรรจุ ซึ่งเป็นจุดเด่นในการลดปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อม
2. ในกรณีที่ไม่มีบริโภคนฟิล์ม ฟิล์มที่ทิ้งไปสามารถย่อยสลายเองตามธรรมชาติ
3. เพิ่มคุณภาพทางประสาทสัมผัส ชวนให้น่ารับประทานผลิตภัณฑ์มากขึ้น และเข้าได้ดีกับสารประกอบที่ให้กลิ่นรส และความหวาน เป็นต้น
4. เสริมคุณค่าอาหาร โดยเฉพาะฟิล์มที่ทำจากโปรตีน
5. ใช้เป็นแผ่นกั้นระหว่างอาหารที่มีองค์ประกอบแตกต่างกัน เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากการถ่ายเทความชื้น และไขมันในเนื้ออาหารที่แตกต่างกัน เช่น พืชจำพวก ผัก เป็นต้น

6. ทำหน้าที่เก็บสารต่อต้านจุลินทรีย์ และสารกันเหี่ยว และยังควบคุมอัตราการซึมผ่านของสารกันเสียจากฟิล์มเข้าสู่เนื้ออาหาร

7. สามารถใช้ร่วมกับฟิล์มพลาสติกโดยใช้ฟิล์มที่รับประทานได้สัมผัสกับอาหารโดยตรง

5. พลาสติกไซเซอร

มณฑาทิพย์ (2535) ได้อธิบายว่า พลาสติกไซเซอรเป็นสารเติมแต่งชนิดหนึ่งที่ใช้ในการผลิตฟิล์ม โดยมีคุณสมบัติในการรวมเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ที่ใช้ทำฟิล์ม มีการระเหยได้ยาก จุดเดือดสูง อาจละลายในตัวทำละลายได้ดี เพื่อมิให้เกิดการแยกตัวของพลาสติกไซเซอรระหว่างการทำแห้งฟิล์ม พลาสติกไซเซอรที่ใช้กับอาหารมีหลายประเภท เช่น มอนอแซคคาไรด์ ไดแซคคาไรด์ และโอลิโกแซคคาไรด์ นอกจากนี้เป็นพวกโพลีออล เช่น ซอร์บิทอล กลีเซอรอล โพลีเอทิลีนไกลคอล เมื่อเติมพลาสติกไซเซอรจะมีผลทำให้ลดความเปราะ, ปรับปรุงการไหล, เพิ่มความเหนียว, ความแข็งแรง และความทนทานต่อแรงดึงซึ่งเกิดเนื่องจากพลาสติกไซเซอรลดแรงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ (ลดแรงยึดเกาะ) ทำให้ค่าต้านทานแรงดึงลดลง และลดอุณหภูมิการเกิดเจลลาทีไนซ์ (Banker, 1966)

กลีเซอรอล หรือ กลีเซอริน (glycerine) เป็นพอลิเมอร์ที่มีคาร์บอน 3 อะตอม มีสูตรโครงสร้าง $C_3H_8O_3$ มีน้ำหนักโมเลกุล 92 เป็นผลพลอยได้จากการผลิตสบู่และกรดไขมัน มีคุณสมบัติเป็นของเหลวที่มีความหนืด รสหวาน 0.6 เท่าของน้ำตาล ผสมเป็นเนื้อเดียวกับน้ำและแอลกอฮอล์ได้ดีมาก เป็นสารทำละลายน้ำมันได้ดีพอสมควร ดูดความชื้นจากอากาศได้ปานกลาง (Windholz *et al.*, 1976)

6. สตาร์ชฟิล์ม

จากการสำรวจเอกสารพบว่ามีการใช้สตาร์ช AM สูง (Mark *et al.*, 1966) หรือการใช้ AM (Rankin *et al.*, 1958) เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตฟิล์มบรีโกลได้ หรือ ฟิล์มที่สามารถย่อยสลายเองตามธรรมชาติ โดยใช้กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มแบบใช้ตัวทำละลาย (solvent casting) เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติทางกลโดยวิเคราะห์ที่สภาวะ 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ของสตาร์ชฟิล์มกับฟิล์มชนิด oriented polypropylene (OPP) ซึ่งเป็นฟิล์มที่ผลิตจากพลาสติกสังเคราะห์ ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มค่าสมบัติทางกลที่เป็นกลาง พบว่าค่าความต้านทานแรงดึง และการยืดตัวของสตาร์ชฟิล์ม เท่ากับ 10 – 100 เมกะพาสกาล และร้อยละ 10 – 50 ตามลำดับ ขณะที่ค่า

ความต้านทานแรงดึง และการยืดตัวของ OPP เท่ากับ 165 เมกะพาสคาล และร้อยละ 60 ตามลำดับ นอกจากนี้สารฟิล์มมีค่าการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor transmission rate-WVTR) น้อยกว่าฟิล์มชนิด low density polyethylene (LDPE) โดยวิเคราะห์ที่สภาวะ 38 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90 (WVTR เท่ากับ 10 – 100 กรัม·มิลลิเมตร/ตารางเมตร·24 ชั่วโมง·บรรยากาศ และ 0.08 กรัม·มิลลิเมตร/ตารางเมตร·24 ชั่วโมง·บรรยากาศ ตามลำดับ) (Krochta and Mulder-Johnston, 1997) สารฟิล์มมีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี เนื่องจากโครงสร้างของ AM และ AP เป็นพวกชอบน้ำ (hydrophilic) สมบัติ hydrophilic ของสารฟิล์มยังส่งผลให้ความแข็งแรงของฟิล์ม (สมบัติทางกล) ลดน้อยลง ตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น เมื่อสารฟิล์มสัมผัสกับความชื้นในอากาศ (Forsell *et al.*, 2002)

สำหรับความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจน (oxygen transmission rate-OTR) ของสารฟิล์มมีค่าอยู่ในช่วงปานกลาง (10 – 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร·ไมโครเมตร/ตารางเมตร·24 ชั่วโมง·บรรยากาศ) เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มชนิด ethylene vinyl alcohol copolymer (EVOH) (0.1 ลูกบาศก์เซนติเมตร·ไมโครเมตร/ตารางเมตร·24 ชั่วโมง·บรรยากาศ) โดยวิเคราะห์ที่สภาวะ 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 0 - 50 (Krochta and Mulder-Johnston, 1997) การเติมพลาสติกไซเซอร์ให้กับฟิล์ม เช่น กลีเซอรอล (glycerol) มีผลทำให้สารฟิล์มสามารถป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนได้ดีขึ้น และมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น (Petersson and Stading, 2005)

7. ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างละเอียดของสารกับสมบัติของสาร

จากการตรวจเอกสาร แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างระดับโมเลกุล (molecular structure) เช่น สัดส่วนและมวลโมเลกุลของ AM และ AP ตลอดจนระดับการแตกกิ่งของไบโอพอลิเมอร์ของสาร ล้วนมีผลต่อคุณสมบัติเชิงหน้าที่เมื่อนำไปละลายหรือกระจายตัวในน้ำ เช่น การทำให้เกิดโครงร่างสามมิติ หรือการเพิ่มความหนืดให้อาหารมีความคงตัว หากใช้สารในระดับที่มีความเข้มข้นสูงพอจะทำให้เกิดเจลได้ โดยแบ่งส่วนใหญ่ที่เกิดเจลได้มักมีส่วนของ AM สูง คุณสมบัติต่อเนื่องจากการเกิดเจลคือการเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำ ผลรวมของคุณสมบัติเชิงหน้าที่เหล่านี้ทำให้สามารถนำสารประกอบคาร์โบไฮเดรตไปใช้ปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร รักษาความชุ่มชื้นของอาหาร หรือใช้เป็นฟิล์มเคลือบอาหาร (ปาริณต, 2545)

เป็นที่รู้กันว่าปริมาณ AM ไม่ใช่ปัจจัยหลักปัจจัยเดียวที่มีผลต่อสมบัติที่หลากหลายของข้าว เนื่องจากมีหลายงานวิจัยที่นำข้าวต่างสายพันธุ์ซึ่งมีปริมาณ AM ที่ใกล้เคียงกัน มาทำการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ ผลปรากฏว่ามีความแตกต่างเกิดขึ้นในระหว่างการแปรรูป และคุณภาพประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์มีความแตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีการพยายามค้นหาอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวโดยนำตัวอย่างข้าวมีปริมาณ AM อยู่ในช่วงเดียวกัน และเป็นข้าวในกลุ่ม sub-species เดียวกัน แล้วตรวจสอบสสารของข้าว เช่น มวลโมเลกุลของ AM และ AP, โครงสร้าง, ขนาด, น้ำหนัก รวมถึงรูปแบบของกิ่งที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของผลิตภัณฑ์ข้าว (Cameron and Wang, 2005; Han and Hamaker, 2001; Mizukami *et al.*, 1999; Ong and Blanshard, 1995; Patindol and Wang, 2002; Vandeputte *et al.*, 2003c)

ตัวอย่างงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่า ความแตกต่างของโครงสร้างละเอียดของสตาร์ชมีผลต่อสมบัติการนำไปใช้ประโยชน์ของสตาร์ช ได้แก่ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะการกระจายตัวของสายโซ่ AP สตาร์ชข้าว และอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีไนซ์ Nakamura *et al.*, 2002; Noda *et al.*, 2003 and Vandeputte *et al.*, 2003a แสดงให้เห็นว่าส่วนสายโซ่สั้น ($\overline{DP}_n < 12$) มีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับค่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีไนซ์ (T_o , T_p และ T_c) ในทางตรงข้ามสายโซ่ส่วนที่มีความยาวกว่า ($12 < \overline{DP}_n < 24$) มีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับค่าที่กล่าวมา Patindol and Wang (2002) และ Wang and Wang (2002) พบความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่าง ส่วนที่มีสายโซ่ยาวมาก ($\overline{DP}_n 37$) กับ T_o , T_p และ T_c ซึ่งน่าจะเกิดจากการที่สายโซ่พันกันเกิดเป็นเกลียวคู่ยาว ซึ่งส่งผลให้ต้องใช้ความร้อนสูงเพื่อคลายเกลียวดังกล่าว

Han and Hamaker (2001) ได้ตรวจสอบโครงสร้างละเอียดของ AP ของสตาร์ชข้าวเจ้า 10 พันธุ์ ที่มีปริมาณ AM อยู่ในช่วงร้อยละ 15-17 และรายงานความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างละเอียดของสตาร์ชข้าวกับค่าความหนืดของสตาร์ชโดยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว พบว่าสายโซ่ AP ที่สั้น ($\overline{DP}_n 17$) จะมีความสัมพันธ์ในเชิงบวก ($r = 0.89$, $p < 0.01$) กับค่า breakdown โดยเมื่อมี AP สายสั้นจำนวนมากจะทำให้ breakdown มาก ในทางกลับกันสำหรับสายโซ่ AP ที่ยาว ($\overline{DP}_n$ มากกว่า 100) มีความสัมพันธ์ในเชิงลบ ($r = -0.84$, $p < 0.01$) กับความหนืดของแป้งเปียกที่ลดลง

งานวิจัยของ Patindol and Wang (2002) ได้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของสตาร์ชข้าว 3 สายพันธุ์ คือ Cypress, Drew และ Wells ที่ผ่านการ debranch ด้วยเอนไซม์ isoamylase และวิเคราะห์โดยเครื่อง HPAEC-PAD พบว่าสตาร์ชข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์มีปริมาณ AM ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงร้อยละ 20-21.8 แต่มีความแตกต่างของความยาวสายโซ่ AP ทำให้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความหนืด

มีความแตกต่างกัน โดยพบว่าสสารซ้เข้าสายพันธุ์ Drew ซึ่งมีช่วง AP ที่มีสายยาว ($\overline{DP}_n$ 37 -60) มากที่สุด (ร้อยละ 14.70) มีค่าอุณหภูมิเจลลาทีในเซชันและเอนทาลปี รวมทั้ง peak viscosity และ breakdown มากที่สุดในกลุ่ม

Wang and Wang (2002) วิเคราะห์โครงสร้างละเอียดของ AP ของสสารซ้เข้าเหนียว 4 พันธุ์ พบว่า ค่า $\overline{DP}_n$ และค่าความยาวของสายโซ่ภายนอก ($\overline{ECL}$) ของ TCW 1 มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 3,218 AGU และ 16 AGU ตามลำดับ สำหรับซ้เข้าเหนียวพันธุ์ TCW 70, TNSW 2 และ Tachimemochi มีค่า $\overline{DP}_n$ ใกล้เคียงกันในช่วง 2,700 AGU แต่มีค่าความยาวของสายโซ่ภายนอกแตกต่างกันโดยแต่ละสายพันธุ์ TNSW 2, TCW 70 และ Tachimemochi มีค่าเท่ากับ 14.4, 11.0 และ 10.8 ตามลำดับ เมื่อนำไปทดสอบสมบัติโดยการวัดค่าความหนืดของสสารซ้พบว่า TCW 70 และ TNSW 2 ซึ่งมีค่า $\overline{ECL}$ ต่ำกว่า มีค่าการคืนตัว (setback) และ break down สูงกว่า TCW 1 และ Tachimemochi

Vandeputte *et al.* (2003a) ได้ทำการย่อยสสารซ้เข้าด้วยเอนไซม์ไอโซแอมิเลสและวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPAEC-PAD พบว่าช่วงของสายโซ่ที่มีค่า $\overline{DP}_n$ อยู่ระหว่าง 12 และ 24 ($12 < \overline{DP}_n < 24$) จะมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับค่าอุณหภูมิเจลลาทีในเซชันเริ่มต้น (T_o), ค่าอุณหภูมิเจลลาทีในเซชันสูงสุด (T_p) และค่าอุณหภูมิเจลลาทีในเซชันสุดท้าย (T_c) เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC แต่ถ้ามีความยาวสายโซ่ที่สั้นมาก ($\overline{DP}_n < 12$) จะมีความสัมพันธ์ในเชิงลบ

Qi *et al.* (2003) ศึกษาโครงสร้างโมเลกุลสสารซ้เข้าเหนียวที่มีค่าอุณหภูมิเจลลาทีในเซชันต่ำและสูง เมื่อทำการ debranch สสารซ้เข้าเหนียวที่มีค่าอุณหภูมิเจลลาทีในเซชันสูงสามารถแบ่งกลุ่มของสายโซ่ได้ทั้งหมด 3 ส่วน (F_3 มีค่า $\overline{DP}_n$ 16, F_2 มีค่า $\overline{DP}_n$ 19 และ F_1 มีค่า $\overline{DP}_n$ 40) สำหรับสสารซ้เข้าเหนียวที่มีค่าอุณหภูมิเจลลาทีในเซชันต่ำ สามารถแยกกลุ่มสายโซ่ได้ออกเป็น 2 ส่วน (F_3 มีค่า $\overline{DP}_n$ 16 และ F_1 มีค่า $\overline{DP}_n$ 51) โดยการที่มีค่าอุณหภูมิเจลลาทีในเซชันสูงหรือต่ำคาดว่าเกิดจากความแตกต่างของปริมาณของส่วน exterior chain ($\overline{DP}_n \sim 19$) เช่น ส่วน F_3 และโดยเฉพาะ F_2 จะมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับค่าอุณหภูมิ T_o , T_p , T_c และค่าเอนทาลปี

8. แนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างละเอียดของสตาร์ชกับคุณภาพของฟิล์มบรีโกลได้

โดยทั่วไปแล้ว ความแข็งแรงของฟิล์ม จะมีแรง 2 ชนิดที่เข้ามาเกี่ยวข้อง ได้แก่ แรงยึดเกาะเป็นแรงระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์ เกิดขึ้นระหว่างการเกิดฟิล์ม ทำให้เกิดการเชื่อมต่อของผิววัตถุเดียวกัน สร้างพันธะที่แข็งแรงซึ่งจะช่วยป้องกันหรือต้านทานการแยกจากกัน และ แรงเกาะติด เป็นแรงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์กับสารอื่นที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มทำให้เกิดโครงร่างของฟิล์มได้ เช่น แรงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์กับพลาสติกไซเซอร (Banker, 1966)

ปัจจัยที่มีผลต่อแรงยึดเกาะ ได้แก่ โครงสร้างและสมบัติทางเคมีของพอลิเมอร์ ระบบการละลาย และสภาวะในการเตรียมฟิล์ม โดยแรงยึดเกาะมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุล ความสม่ำเสมอของโครงสร้างสายโซ่ และการแผ่กิ่งก้านสาขา โดยพอลิเมอร์ที่มีสายยาวทำให้เกิดการยึดเกาะกันได้ดี ถ้าโมเลกุลของพอลิเมอร์ละลายหรือขยายตัวได้มากที่สุดจะได้โครงสร้างซึ่งเชื่อมกันด้วยแรงยึดเกาะที่มาก ฟิล์มที่ได้มีความแข็งแรง ระดับของการยึดเกาะมีผลต่อคุณสมบัติของฟิล์ม ได้แก่ สภาพให้ซึมผ่านได้ (permeability) ความยืดหยุ่น และความเปราะ เป็นต้น (Banker, 1966)

สตาร์ชประกอบด้วย AM ซึ่งเป็นพอลิเมอร์สายยาว และ AP ที่เป็นพอลิเมอร์โมเลกุลใหญ่ที่มีกิ่งมาก ทั้งสองส่วนประกอบของสตาร์ชสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ แต่ฟิล์ม AM จะมีสมบัติทางกล และสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนที่ดีกว่าฟิล์มของ AP (Rindlav-Westling *et al.*, 1998) Lourdin *et al.* (1995) กล่าวว่าค่าความต้านทานแรงดึงและร้อยละการยืดตัวของฟิล์มจาก AM ของถั่วกับ AP ของข้าวโพดข้าวเหนียวที่ไม่มีการเติมพลาสติกไซเซอรมีค่าเพิ่มขึ้น (40 เมกะพาสคาลเป็น 70 เมกะพาสคาล และร้อยละ 4 เป็น 6 ตามลำดับ) เมื่อเพิ่มปริมาณของ AM เพิ่มในสูตรเตรียมฟิล์มจากร้อยละ 0 ถึง 100 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wolff *et al.* (1951) พบว่า AM ของข้าวโพดขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ง่าย โดยฟิล์มที่ประกอบด้วย AM และ AP ของข้าวโพด ที่มีอัตราส่วนแตกต่างกัน (ปริมาณ AM ร้อยละ 29 – 95) เมื่อทำการเก็บรักษาที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 เป็นเวลา 4 วันที่อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส ฟิล์มดังกล่าวมีค่าการต้านทานแรงดึงขาด อยู่ในช่วง 63.43 – 70.33 เมกะพาสคาล และมีการยืดตัวร้อยละ 11 -18 นอกจากนี้ความยาวเฉลี่ยของ AM มีผลต่อสมบัติของฟิล์ม โดยความยาวเฉลี่ยของ AM ในช่วง 310 – 820 AGU มีการเปลี่ยนแปลงโดยความขุ่นของฟิล์มมีค่าลดลง (ร้อยละ 58 เป็น 10), การต้านทานแรงดึงขาดเมื่อฟิล์มเปียกเพิ่มขึ้น (0.05 เป็น 0.10 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร) และการยืดตัวเมื่อฟิล์มเปียกเพิ่มขึ้น (ร้อยละ 4 เป็น 15)

Lloyd and Kirst (1963) วิเคราะห์ผลของปริมาณ AP ต่อสมบัติของสตาร์ชฟิล์ม โดยเปรียบเทียบระหว่างสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวกับสตาร์ชข้าวโพด AM สูง (ปริมาณ AM เท่ากับ ร้อยละ 0.8 และ 50 ตามลำดับ) พบว่าฟิล์มสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวจะมีค่าความต้านทานแรงดึง ยืดต่ำกว่าฟิล์มของข้าวโพด AM สูง (3.49 และ 5.03 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ) เช่นเดียวกับการยืดตัว (ร้อยละ 1.7 และ 2.5 ตามลำดับ) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณ AM ลดลง ค่าต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัวจะลดลง และเมื่อค่าความชื้นของฟิล์มเพิ่มมากขึ้นจาก ร้อยละ 35 เป็น ร้อยละ 65 จะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงยืดลดลงร้อยละ 43 และการยืดตัวลดลงจากร้อยละ 3.5 เป็น 2.2

ลักษณะการยืดหยุ่นของพอลิเมอร์สตาร์ชยังขึ้นอยู่กับปริมาณพลาสติกไซเซอร์ โดยระบบที่มีพลาสติกไซเซอร์ในระดับต่ำจะให้ฟิล์มที่มีลักษณะแข็งและแตกเปราะได้ง่าย ในขณะที่เมื่อมีปริมาณพลาสติกไซเซอร์สูงขึ้น ระบบสตาร์ช-พอลิเมอร์ จะมีลักษณะคล้ายยาง (rubber) เนื่องจากปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่สูงขึ้น จะทำให้แรงระหว่างพอลิเมอร์ลดลง และสายโซ่ของสตาร์ชสามารถเคลื่อนที่ได้มากขึ้น ดังนั้นการสร้างพันธะระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชกับโมเลกุลของพลาสติกไซเซอร์โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สตาร์ชและกลีเซอรอลจะทำให้พอลิเมอร์จะมีความเหนียวแน่นแข็งแรง อย่างไรก็ตามเมื่อระบบมีปริมาณพลาสติกไซเซอร์สูงเกินไป จะทำให้พอลิเมอร์นุ่มเกินไปเช่นกัน เนื่องจากการสร้างพันธะของสายโซ่ของสตาร์ชต่ำ เป็นผลให้มีลักษณะเหมือนแป้งเปียก (Van Soest and Vliegthart, 1997)

จากการตรวจเอกสารที่ผ่านมา แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของอิทธิพลของโครงสร้างละเอียดของสตาร์ช ที่มีต่อการผลิตฟิล์มที่มีคุณภาพ เพราะลักษณะของโครงสร้างละเอียดที่มีความแตกต่างกัน ส่งผลต่อสมบัติการนำไปใช้ประโยชน์ของสตาร์ชที่ต่างกัน และจากการตรวจเอกสารพบว่ายังไม่มีงานวิจัยที่เน้นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างละเอียดของสตาร์ชข้าวเจ้าไทยที่มีระดับ AM สูงกับสมบัติทางฟิสิกส์ และทางกลของสตาร์ชฟิล์ม ทั้งนี้อาจเนื่องจากข้าวเจ้าที่มีปริมาณ AM สูงพบได้มากในประเทศไทย ซึ่งงานวิจัยนี้จะมีประโยชน์ทำให้ได้ข้อมูลพื้นฐานเชิงลึก และสามารถนำไปใช้สำหรับงานวิจัยอื่นๆ ต่อไปได้

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

1.1 ข้าวแอมิโลสสูง (AM ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 25) 10 สายพันธุ์ ซึ่งจากสถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร โดยพันธุ์ข้าวเจ้า พลายงามปราจีนบุรี, เล็บมีอนาง 111, ปราจีนบุรี 1 และ ชัยนาท 1 มาจากแหล่งเพาะปลูกเขตปราจีนบุรี พันธุ์ข้าวเจ้า กข 23, สุพรรณบุรี 1, สุพรรณบุรี 90 และปทุมธานี 60 มาจากแหล่งเพาะปลูกเขตปทุมธานี และพันธุ์ข้าวเจ้า เจริญพัทธง และแก่นจันทร์ มาจากแหล่งเพาะปลูกเขตพัทลุง ข้าวทั้งหมดเก็บเกี่ยวในช่วงปี พ.ศ. 2546 ข้าวเปลือกทุกพันธุ์ผ่านการขัดสีแบบพิเศษ (ระดับ 2) ที่ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี นำมาไม่เปียกด้วยไอน้ำไฟฟ้า อบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง บดละเอียดด้วยเครื่องบดตัวอย่างอาหารแห้ง ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช (150 ไมครอน) บรรจุในถุงพลาสติกแบบพอลิเอทิลีน และเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

1.2 ชุดพูลูลูแลนมาตรฐาน (standard pullulan) P – 82 ของบริษัท Showa Denko lot no. 50601 (Tokyo, Japan) ประกอบด้วย P-50 มวลโมเลกุล 4.46×10^4 ดาลตัน, P-100 มวลโมเลกุล 1.00×10^5 ดาลตัน, P-200 มวลโมเลกุล 1.89×10^5 ดาลตัน, P-400 มวลโมเลกุล 3.58×10^5 ดาลตัน และ P-800 มวลโมเลกุล 6.41×10^5 ดาลตัน

1.3 ชุดน้ำตาลมาตรฐานของบริษัท Hayashibara Biochemical Laboratories, Inc. lot no. 511161 (Okayama, Japan) ประกอบด้วย maltopentose 1 กรัม, maltohexaose 1 กรัม และ maltoheptaose 1 กรัม

1.4 เอนไซม์ไอโซแอมิเลส (isoamylase; EC 3. 2. 1. 68) ของบริษัท Hayashibara Biochemical Laboratories, Inc. lot no. 701271 (Okayama, Japan) 59,000 หน่วยต่อมิลลิกรัม โปรตีน

1.5 เอนไซม์บีตา-เอมิเลส (β -amylase) EC 3. 2. 1. 2 (A-7005) ของบริษัท Sigma lot no. 100K7039 (St. Louis, USA) 10,000 หน่วยต่อมิลลิกรัมโปรตีน จาก sweet potato

1.6 ชุดทดสอบปริมาณเอมิโลสและเอมิโลเพกทิน (amylose/amylopectin assay kit) ของบริษัท Megazyme International Ireland Ltd. (Wicklow, Ireland)

1.7 Media สำหรับ gel permeation chromatography sephacryl S-500 high resolution 450 มิลลิตร ของบริษัท GE Healthcare Bio-Sciences (Uppsala, Sweden) ช่วงขนาดของโมเลกุลที่แยกได้เท่ากับ $4 \times 10^4 - 2 \times 10^7$ ดาลตัน

2. อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 2.1 เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส (pH meter) ของบริษัท Jenco
- 2.2 เครื่องชั่งสารทศนิยม 4 ตำแหน่ง (analytical balance) ของบริษัท Sartorius
- 2.3 เครื่องชั่งสารทศนิยม 2 ตำแหน่ง (analytical balance) ของบริษัท OHAUS
- 2.4 เครื่องเหวี่ยงแยกตะกอนอุณหภูมิต่ำ (refrigerated centrifuge) ของบริษัท Sartorius
- 2.5 เครื่องเหวี่ยงแยกตะกอน (centrifuge) ของบริษัท Harmonic
- 2.6 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath) ของบริษัท Memmert
- 2.7 อ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิ (oil bath) ของบริษัท Memmert
- 2.8 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller)
- 2.9 เพลตพลาสติกชนิดพอลิสไตรีนขนาด 140 มิลลิเมตร (polystyrene plastic plate)
- 2.10 ตู้อบไฟฟ้าลมร้อน (hot air oven) ของบริษัท WTB Binder รุ่น FD 53
- 2.11 ตู้อบไฟฟ้า (hot oven) ของบริษัท WTB Binder รุ่น FD R3
- 2.12 เครื่องบดตัวอย่างอาหารแห้ง (hammer mill)
- 2.13 เครื่อง different scanning calorimeter (DSC) ของบริษัท Mettler-Toledo
- 2.14 เครื่อง rapid visco analyzer (RVA) ของบริษัท Newport
- 2.15 เตาเผา (furnace) ของบริษัท Carbolite รุ่น ELF 11/14B/201
- 2.16 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) ของบริษัท Helios γ
- 2.17 ชุดเครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน ของบริษัท Buchi
- 2.18 ชุดเครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (Soxtec) ของบริษัท Tecator รุ่น HT 220

2.19 Low pressure chromatography (gel permeation chromatography) ของบริษัท GE Healthcare Bio-Sciences รุ่น C26/100

2.21 ตู้ระบายน้ (hood) ของบริษัท Major Scientific products

2.22 Vortex mixer ของบริษัท Scientific Industries รุ่น Genie 2

2.23 ตะแกรงร่อนขนาด 100 และ 200 เมช ของบริษัท Retsch

2.24 ชุดเครื่องแก้วต่างๆ (glassware)

2.25 สารเคมีต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์

วิธีการ

1. การสกัดสารจากแป้งข้าวเจ้า

การสกัดสารข้าวเจ้าใช้วิธีดัดแปลงจาก Yamamoto *et al.* (1973) แป้งข้าวเจ้าในสารละลายเบส (0.05 โมลาร์ NaOH) โดยใช้อัตราส่วนระหว่างแป้งต่อสารละลายต่าง เท่ากับ 2 : 5 โดยน้ำหนักแห้ง เป็นเวลา 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง นำไปหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องเหวี่ยงแยกตะกอน อุณหภูมิต่ำที่ 3000 x g เป็นเวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส หลังจากกำจัด supernatant ออก นำแป้งส่วนที่ตกตะกอนไปแช่ในสารละลายต่างด้วยอัตราส่วนเท่าเดิม คือ 2:5 และทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง กรองสารละลายสตาร์ช (slurry) ผ่านตะแกรง 200 เมช (75 ไมครอน) จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงที่ 3000 x g เป็นเวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำส่วน sediment ผสมกับน้ำกลั่น (1000 มิลลิลิตร) และปรับความเป็นกรด-ด่างให้เท่ากับ 6.5 – 7.0 ด้วยสารละลายกรด HCl ที่มีความเข้มข้น 1 โมลาร์ และล้างด้วยน้ำกลั่น (1000 มิลลิลิตร) หมุนเหวี่ยงที่ 3000 x g เป็นเวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ขั้นตอนการล้างและการหมุนเหวี่ยงถูกกระทำซ้ำอีก 2 ครั้ง จากนั้นชุดเอาส่วนของโปรตีนออก อบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน 40 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง บดสตาร์ชด้วยมือโดยใช้โกร่ง และร่อนผ่านตะแกรง 100 เมช และบรรจุในถุงพลาสติกแบบโพลีเอทิลีน และเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

2. การวิเคราะห์ และตรวจสอบสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้า

2.1 การวิเคราะห์สมบัติของแป้ง และสตาร์ชข้าวเจ้า

2.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนใช้วิธีการ เกล็ดตาล และเปลี่ยนค่าไนโตรเจนเป็นร้อยละโปรตีนโดยคูณด้วยค่า converting factor 6.25 (AOAC, 1995) วิธีการตามภาคผนวก ก (1) หาค่าปริมาณไขมันโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณไขมัน Soxtec (AOAC, 1995) วิธีการตามภาคผนวก ก (2) หาปริมาณเถ้า (AACC Method 08-01(AACC, 2000a)) โดยวิธีการตามภาคผนวก ก (3) การวิเคราะห์ความชื้นใช้วิธีการอบแห้งตัวอย่างเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ 130 องศาเซลเซียส (AACC Method 44-15A (AACC, 2000b) วิธีการตามภาคผนวก ก (4) และหา ปริมาณเส้นใย (AOAC, 1995) ตามภาคผนวก ก (5)

2.1.2 การวิเคราะห์ทางเคมี การวิเคราะห์หาปริมาณแอมิโลสใช้วิธีการวิเคราะห์ 2 วิธี คือ วิธีการของ Christil (1987) ภาคผนวก ก (6) และ วิธีที่ 2 ใช้ชุดทดสอบปริมาณแอมิโลสและ แอมิโลเพกทิน (Megazyme International, Ireland) โดยใช้หลักการของ Yun and Matheson (1990) ใช้ Concanavalin A (Con A) ตกตะกอนส่วนของแอมิโลเพกทินออก และวัดเฉพาะส่วนของ แอมิโลส โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 510 นาโนเมตร วิธีการตามภาคผนวก ก (7)

2.1.3 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ โดยการตรวจสอบอุณหภูมิเจลาทีไนซ์ และเอนทัลปีของสตาร์ชข้าวเจ้าโดยใช้เครื่อง differential scanning calorimeter DSC822° (Mettler Toledo Co., Switzerland) ดัดแปลงวิธีจาก Fan and Marks (1998) โดยชั่งตัวอย่างน้ำหนักแห้ง 3 มิลลิกรัม ในถ้วยอะลูมิเนียม (aluminum pan) และเติมน้ำกลั่น 7.5 ไมโครลิตร เย็บปิดฝา และทิ้ง ตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องข้ามคืน อัตราการให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง คือ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จาก 30 ถึง 130 องศาเซลเซียส และทำการ calibrate โดยใช้อินเดียม (indium) และ ถ้วยอะลูมิเนียม เปล่า (empty pan) เป็นชุดอ้างอิง (reference)

2.1.4 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ โดยวิเคราะห์กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชข้าว (pasting curve) กระทำโดยใช้ rapid visco analyzer (Newport, Sweden) ดัดแปลงจากวิธีของ Lumdubwong and Seib (2000) โดยใช้สตาร์ช 2.7 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ผสมกับ น้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร ใช้ระยะเวลาในการทดลอง 20 นาที โดยกำหนดให้อุณหภูมิของระบบอยู่ที่ 50 องศาเซลเซียสนาน 2 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 95 องศาเซลเซียสด้วยอัตราเร็ว 7.5 องศาเซลเซียสต่อนาที คงอุณหภูมิระบบที่ 95 องศาเซลเซียสนาน 2 นาที และลดอุณหภูมิเป็น 50 องศาเซลเซียสด้วยอัตราเร็ว 7.5 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นคงอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสเป็น เวลานาน 4 นาที

2.1.5 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ โดยวิเคราะห์สมบัติการพองตัวและการละลายของสตาร์ซกระทำที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส โดยดัดแปลงจากวิธีของ Vandeputte *et al.* (2003b) โดยชั่งสตาร์ซ 0.3 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ลงในน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร จากนั้นให้ความร้อนที่ 75 องศาเซลเซียส ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 15 นาที โดยพลิกหลอดทดลองกลับไปมาทุก 5 นาที ก่อนให้ความร้อนที่ 120 องศาเซลเซียสในอ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิอีก 15 นาที โดยพลิกหลอดทดลองกลับไปมาทุก 5 นาที หลังจากนั้นเหวี่ยงแยกตะกอนที่ $3000 \times g$ 15 นาที ชั่งน้ำหนักเจลและฟิล์มนำมาคำนวณค่าสมบัติการพองตัวและการละลายของสตาร์ซตามภาคผนวก ก (8)

2.2 การแยกแอมิโลสและแอมิโลเพกทินใช้วิธีการแยกแบบ low pressure gel permeation chromatography ดัดแปลงจากวิธีการเตรียมตัวอย่างของ Aboubacar *et al.* (2006) ชั่งสตาร์ซ 20 มิลลิกรัม (น้ำหนักแห้ง) ในหลอด centrifuge ขนาด 50 มิลลิลิตร ปิเปต ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (dimethyl sulfoxide-DMSO) ความเข้มข้นร้อยละ 90 ปริมาณ 5 มิลลิลิตร ละลายสตาร์ซในหลอดนำไปต้มในน้ำเดือดนาน 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็น แล้วกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก ที่อุณหภูมิห้อง นาน 48 ชั่วโมง จากนั้นเติมเอทานอลบริสุทธิ์ 30 มิลลิลิตรเพื่อทำการตกตะกอนสตาร์ซ แล้วหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องเหวี่ยงแยกตะกอนอุณหภูมิต่ำที่ $3000 \times g$ เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส กำจัดส่วนของสารละลายด้านบนทิ้ง ส่วนตกตะกอนนำไปเติมเอทานอลบริสุทธิ์ (30 มิลลิลิตร) และทำการหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว $3000 \times g$ เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นกำจัดสารละลายด้านบนทิ้ง ขั้นตอนดังกล่าวทำซ้ำอีก 2 ครั้ง ก่อนนำสตาร์ซส่วนที่ตกตะกอนหรือสกัดไขมันออกไปแล้ว ไปทำแห้งใน dessicator เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ตัวอย่างที่แห้งแล้วถูกนำมาละลายในน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร ต้มและกวนด้วยแท่งแม่เหล็กในน้ำเดือดนาน 30 นาทีจนกระทั่งตัวอย่างละลายหมด (ความเข้มข้น ประมาณ 2 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็น การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของ AM และ AP ของสตาร์ซข้าว กระทำโดยฉีดสารละลายสตาร์ซ (7 มิลลิลิตร) เข้าไปในระบบ gel permeation chromatography เพื่อผ่านคอลัมน์ sephacryl S-500 high resolution (GE Healthcare Bio-Sciences, Sweden) โดยเก็บตัวอย่างด้วยอัตราเร็ว 18 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และเก็บตัวอย่างหลอดละ 3 มิลลิลิตร คิดเป็นจำนวนหลอดทั้งสิ้น 160 หลอดต่อหนึ่งตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตโดยวิธี phenol-sulfuric (Dubois *et al.*, 1956) โดยปิเปตตัวอย่างที่เก็บได้ 1 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลาย ฟีนอลความเข้มข้นร้อยละ 5 ปริมาณ 1 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร ผสมกันให้เข้ากัน (vortex) ทิ้งหลอดทดลองไว้ในตู้ระบายควัน เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์นาน 30 นาที และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 490 นาโนเมตร

2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างละเอียดของสตาร์ชข้าวเจ้า

2.3.1 วิเคราะห์ความยาวโมเลกุลเฉลี่ยของสตาร์ชข้าว (degree of polymerization, $\overline{DP}_n$) และมวลโมเลกุล ($\overline{M}_n$) ใช้วิธีการดัดแปลงจากวิธีของ Park and Johnson (Hizukuri, 1986) วิธีการวิเคราะห์ดังกล่าวผก ก (9) สำหรับการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของ AM และ AP กระทำโดยการเทียบกับชุดพอลิเมอร์มาตรฐาน P – 82 (P800, P400, P200, P100 และ P50) คำนวณค่าจากสมการของ Park *et al.* (2007) ผก ก (10) ใช้ค่าปริมาณ AM และ AP จากการวิเคราะห์โดยวิธีการ Con A และคำนวณค่า $\overline{DP}_n$ โดยหารมวลโมเลกุลด้วย 162

2.3.2 การวิเคราะห์การย่อยสลายอะไมโลไลซิส (% β -amylolysis) วิธีการของ Zhu and Bertoft (1997) ละลายสตาร์ช 2.5 มิลลิกรัม (น้ำหนักแห้ง) ในน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร ต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นปีปเตสารละลายสตาร์ช 0.5 มิลลิลิตรผสมกับแอซีเทตบัฟเฟอร์ 0.1 โมลาร์ที่ระดับความเป็นกรด-เบส 4.8 เป็นปริมาตร 0.495 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ปีปเตเอนไซม์อะไมเลส 5 ไมโครลิตร (50 units) บ่มที่อุณหภูมิห้องนาน 5 ชั่วโมง จากนั้นวัดค่าน้ำตาลรีดิวซ์ (Somogyi-Nelson) ตามผก ก (11) และนำค่าที่ได้ไปคำนวณร้อยละอะไมโลไลซิส

2.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะการกระจายของสายโซ่ (chain length distribution) ของสตาร์ช ดัดแปลงจากวิธีการของ Jane and Chen (1992) โดยชั่งสตาร์ช 5 มิลลิกรัม (น้ำหนักแห้ง) ละลายด้วย ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ร้อยละ 90 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ตกตะกอนด้วยเมทานอล 4 มิลลิลิตร หมุนเหวี่ยงแยกตะกอนด้วยเครื่องเหวี่ยงแยกตะกอนอุณหภูมิต่ำ 2500 x g เป็นเวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ละลายตะกอนที่ได้ด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water) 4.5 มิลลิลิตร ต้มสารละลายดังกล่าวในน้ำเดือด ทำให้เย็นเท่าอุณหภูมิห้อง เติม 0.4 โมลาร์ โซเดียมแอซีเทตบัฟเฟอร์ ความเป็นกรด-เบส 3.5 ปริมาตร 0.490 มิลลิลิตร และเอนไซม์ไอโซอะมิเลส 15 ไมโครลิตร (885 หน่วย) บ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง และให้ความร้อน 20 นาทีเพื่อหยุดการทำงานของเอนไซม์ กรองตัวอย่างผ่านแผ่นกรองไนลอนขนาด 0.45 ไมครอน นิดตัวอย่างปริมาณ 25 ไมโครลิตร โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ คือ high-performance anion-exchange chromatography ร่วมกับ pulsed amperometric detector (Dionex, Sunnyvale, CA) ซึ่งประกอบด้วย GS50 gradient pump, CarboPac PA1 guard column (2 × 50 มิลลิเมตร), CarboPac PA1 analytical column (2 × 250 มิลลิเมตร) และ AS50 automated sampler เฟสเคลื่อนที่ (mobile

phase) 2 ชนิด คือ 150 มิลลิโมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 150 มิลลิโมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ผสมกับ 500 มิลลิโมลาร์ โซเดียมแอซิเตต ใช้อัตราการไหลในการวิเคราะห์เท่ากับ 0.3 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง โดยมี wave form ดังนี้ E_1 0.05V (t_1 0), E_2 0.05V (t_2 0.20), E_3 0.05V (t_3 0.40), E_4 0.75V (t_4 0.41), E_5 0.75V (t_5 0.60), E_6 -0.15V (t_6 0.61) และ E_7 -0.15V (t_7 1.00) และมีค่า gradient profile เริ่มที่ A:B = 75:25 % (t_1 = 0), A:B = 60:40 % (t_2 = 7 นาที), A:B = 10:90 % (t_3 = 67 นาที), A:B = 0:100 % (t_4 = 67.1 นาที) และ A:B = 0:100 % (t_5 = 80 นาที) และวัดการกระจายตัวของสายโซ่ของปริมาณ AP สัมพัทธ์ของข้าวไทยตั้งแต่ช่วง $\overline{CL}_n$ 6 ถึง $\overline{CL}_n$ 53

3. การผลิตและทดสอบสมบัติของฟิล์มจากสตาร์ชข้าวเจ้า

3.1 การผลิตฟิล์มสตาร์ชข้าวเจ้าดัดแปลงวิธีการจาก (Mehyar and Han, 2004) เตรียมสารละลายสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง (สตาร์ชข้าว 3 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร) ในขวดรูปชมพู่ขนาด 1000 มิลลิลิตร เติมหีสโครอลโดยอัตราส่วนระหว่าง พลาสติกไฮเซอริกไฮเซอโรลต่อสตาร์ชคือ 1:2 โดยน้ำหนัก (กลีเซอรอล 1.5 กรัมต่อสตาร์ช 3 กรัม) ผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที ใช้ส้อมดูดด้านบนขวดรูปชมพู่ และกวนสารละลายซึ่งอยู่ในขวดชมพู่ด้วยแท่งแม่เหล็กความเร็ว 200 รอบต่อนาที ในอ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิ ที่ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นเทสารละลายที่ได้ปริมาณ 50 มิลลิลิตรในจานเพาะเชื้อพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 140 มิลลิเมตร (sterilin, U.K.) นำไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง นำไปเก็บที่ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 นาน 48 ชั่วโมงก่อนการทดลอง

3.2 การตรวจสอบสมบัติของฟิล์มสตาร์ชข้าวเจ้า การวัดความหนาของฟิล์มโดยใช้วิธีดัดแปลงจาก Bulter *et al.* (1996) ทำการตัดตัวอย่างให้ได้ขนาด 2.5×10 เซนติเมตร วัดความหนาด้วยเครื่องวัดความหนา (Mitutoyo micrometer, Japan) ตัวอย่างละ 10 จุด สำหรับการวัดค่าความต้านทานแรงดึงขาด ค่าโมดูลัสของยังและค่าร้อยละการยืดตัวของฟิล์ม ใช้วิธีมาตรฐาน ASTM D 882-00 (ASTM, 2000) โดยเตรียมตัวอย่างฟิล์มให้มีความกว้าง 25 ± 0.01 มิลลิเมตร และยาว 100 มิลลิเมตร ที่มีขอบเรียบและขนานกัน ใช้หัวทดสอบแบบ tension ที่มีลักษณะเป็นหัวหนีบ 2 หัว ตั้งระยะห่างกัน 50 มิลลิเมตร ยึดปลายข้างหนึ่งของชิ้นตัวอย่างเข้ากับหัวทดสอบให้แน่น แล้วจึงยึดปลายอีกด้านหนึ่ง ใช้ load cell ขนาด 1 กิโลกรัม ทำการทดสอบโดยปรับความเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที จนตัวอย่างขาดออกจากกัน รายงานค่าความต้านทานแรงดึงขาด (เมกะพาสคาล) ค่าโมดูลัสของยัง และค่าร้อยละการยืดตัว

4. การวิเคราะห์ทางสถิติ

การทดลองทั้งหมดวิเคราะห์ค่าอย่างน้อย 2 ซ้ำ ยกเว้นการวัดสมบัติทางกลของฟิล์มใช้ตัวอย่างฟิล์มอย่างน้อย 6 ชิ้น ในการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยทำการวิเคราะห์หาความแตกต่างระหว่างตัวอย่างโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance-ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลด้วยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) และหาความสัมพันธ์โดยใช้ Pearson correlation วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม SPSS version 11.5

5. สถานที่ทำการทดลอง

ห้องปฏิบัติการส่วนกลาง ห้องปฏิบัติการเคมี ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร และโครงการจัดตั้งภาควิชาเทคโนโลยีทางกระบวนการเคมีและฟิสิกส์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อาคารแปรรูป 1 และ 2 คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ

6. ระยะเวลาการทำวิจัย

การทดลองเริ่มตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2547 และสิ้นสุดเมื่อเดือนมีนาคม พ.ศ. 2550

ผลและวิจารณ์

องค์ประกอบเคมีของแป้งและสตาarchข้าวแอมิโลสสูง

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของแป้งข้าวเจ้า

พันธุ์ข้าว	โปรตีน (ร้อยละ)	ลิพิด (ร้อยละ)	เถ้า (ร้อยละ)	เส้นใยหยาบ (ร้อยละ)	ความชื้น (ร้อยละ)
ปราจีนบุรี 1	5.81 a	0.09 a	0.50 a	0.22 a	9.31 bc
แก่นจันทร์	5.96 a	0.04 a	0.49 a	0.21 a	9.57 c
พลาญงามปราจีนบุรี	6.25 b	0.09 a	0.58 a	0.16 a	8.15 a
เจียวกู่หลาน	6.52 c	0.09 a	0.57 a	0.20 a	10.23 de
กข 23	6.72 c	0.08 a	0.64 a	0.17 a	10.07 d
ปทุมธานี 60	7.10 d	0.03 a	0.59 a	0.24 a	10.32 de
เล็บมือนาง 111	7.11 d	0.09 a	0.71 a	0.19 a	10.93 f
สุพรรณบุรี 90	7.16 d	0.05 a	0.54 a	0.22 a	10.64 ef
สุพรรณบุรี 1	7.22 d	0.05 a	0.57 a	0.13 a	9.04 b
ชัยนาท 1	7.63 e	0.06 a	0.71 a	0.19 a	10.30 de

หมายเหตุ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DMRT โดยตัวอักษรที่ต่างกันในแนวดังแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวไทยแอมิโลสสูง 10 สายพันธุ์ ข้าวทั้งหมดมีปริมาณโปรตีนในช่วงร้อยละ 5.8 – 7.6 ซึ่งสูงกว่าที่รายงานไว้เล็กน้อย (Zhou *et al.*, 2002) โดยเฉพาะสุพรรณบุรี 90, เล็บมือนาง 111, ปทุมธานี 60 และสุพรรณบุรี 1 (โปรตีนประมาณร้อยละ 7.1 – 7.2) ปราจีนบุรี 1 และแก่นจันทร์ มีปริมาณโปรตีนต่ำที่สุด ในกลุ่มข้าวทั้งหมด (ประมาณร้อยละ 5.8 – 6.0) ปริมาณเถ้าและเยื่อใยมีค่าในช่วงร้อยละ 0.49 – 0.71 และร้อยละ 0.13 – 0.22 ตามลำดับ ร้อยละลิพิดของแป้งข้าวมีค่าต่ำกว่าที่รายงานไว้ (ร้อยละ 0.6)

เมื่อทำการแยก non-starch protein ออกจากแป้งข้าวโดยใช้สารละลายเบส ผลปรากฏว่าสตาarchมีปริมาณโปรตีนลดลงโดยข้าวทุกสายพันธุ์มีร้อยละโปรตีนต่ำกว่าร้อยละ 0.50 (ตารางที่ 2)

โปรตีนที่เหลืออยู่ในสตาร์ชคาดว่าเป็น integral protein ซึ่งไม่สามารถแยกออกจากสตาร์ชได้ Han and Hamaker (2002) รายงานว่า starch protein คือ กลุ่มโปรตีน integral ซึ่งเกิดจาก waxy protein หรือ granule-bound starch synthase มีหน้าที่ในการควบคุมกระบวนการสร้าง AM ดังนั้นกลุ่ม waxy starch จะไม่พบโปรตีนดังกล่าว ดังนั้นสตาร์ช AM สูงจึงมีปริมาณ integral protein สูงกว่า สตาร์ชข้าว AM ต่ำ หรือ สตาร์ชข้าวเหนียวต่างๆ จากการศึกษาพบว่าสตาร์ชข้าวทั้งหมดมีปริมาณโปรตีน ลิพิด เถ้า และความชื้นอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้จึงกล่าวได้ว่า สตาร์ชทุกตัวอย่างมีความบริสุทธิ์ พร้อมที่จะนำไปทำการวิเคราะห์ต่อไป

เกณฑ์การคัดเลือกพันธุ์ข้าวเพื่อนำไปทำการผลิตฟิล์ม

เนื่องจากงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการคัดเลือกข้าวที่มีระดับ AM สูงแต่มีความใกล้เคียงกันมากที่สุด เพื่อลดอิทธิพลของระดับ AM ที่ต่างกันและอาจมีผลต่อสมบัติทางกลของฟิล์มให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ การวิเคราะห์ปริมาณ AM จึงใช้วิธีการ 2 วิธี ควบคู่กันไป ได้แก่ วิธี iodine binding และวิธีการใช้เอนไซม์ Concanavalin A ซึ่งวิธี iodine binding เป็นการวัดปริมาณความเข้มของสีน้ำเงิน (ความยาวคลื่น (λ) 645 นาโนเมตร) ที่เกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง AM หรือในที่นี้คือกลูโคสพอลิเมอร์ที่เป็นสายยาวตรง และไอโอดีน ขณะที่การใช้ Con A เป็นการวัดความสามารถของเอนไซม์ดังกล่าว เข้าทำปฏิกิริยาจับกับ non-reducing ends ของกลูโคสพอลิเมอร์ โดยจำนวนการจับกันระหว่าง Con A และ non-reducing ends ที่มีมากต่อหนึ่ง โมเลกุลของ AP เนื่องมาจากลักษณะโมเลกุลที่มีความเป็นกิ่งสูง จะทำให้ AP เกิดการตกตะกอน และสามารถวิเคราะห์ปริมาณ AM ของสตาร์ชได้ โดยการนำเอา AM หรือ ส่วนใส (supernatant) ที่ได้หลังจากการตกตะกอนแยก AP ออกไป มาทำการย่อยด้วย amyloglucosidase ร่วมกับ α -amylase และทำการวัดปริมาณ AM ในรูปของน้ำตาลกลูโคส (Gibson *et al.*, 1997) จากการวัดปริมาณ AM โดยใช้วิธีวิเคราะห์ 2 วิธี ดังที่กล่าวมา พบว่าระดับ AM ของข้าวไทยทุกสายพันธุ์ มีค่ามากกว่าร้อยละ 25 (Juliano, 1998) และอยู่ในช่วงร้อยละ 26 – 35 ตามที่งามชื่น (2545) กำหนดว่าเป็นสตาร์ชกลุ่ม AM สูง ระดับ AM ของข้าวไทยที่วัดได้จาก วิธี iodine binding และวิธี Con A อยู่ในช่วงร้อยละ 26.6 – 35.6 และร้อยละ 28.2 – 34.3 ตามลำดับ

พันธุ์ข้าว กข 23, สุพรรณบุรี 1, เล็บมือนาง และปราชญ์บุรี 1 มีค่า AM ที่วัดจากวิธี Con A สูงกว่าที่วัดจากวิธี iodine binding (ตารางที่ 2) ความแตกต่างนี้อาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนของการทดลองเพราะโดยทั่วไปวิธีการวัด AM โดยใช้วิธี iodine binding ควรให้ผลสูงกว่าวิธี Con A

สำหรับสตา์ช AM สูง เนื่องจากสตา์ช AM สูง มักจะประกอบด้วย AP ที่มีสายยาว และสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนเกิดเป็นสารสีน้ำเงินเข้มได้เช่นกัน (Gibson *et al.*, 1997)

ตารางที่ 2 ปริมาณแอมิโลสและองค์ประกอบของสตา์ชข้าวเจ้าแอมิโลสสูง 10 พันธุ์

พันธุ์ข้าว	แอมิโลส (ร้อยละ)		โปรตีน (ร้อยละ)	ลิพิด (ร้อยละ)	เถ้า (ร้อยละ)	ความชื้น (ร้อยละ)
	วิธี Iodine	วิธี Con A				
กข 23	26.63 a	28.19 a	0.18 a	0.020 a	0.10 cd	10.90 a
สุพรรณบุรี 1	32.76 bc	34.33 a	0.20 a	0.020 a	0.06 a	10.98 a
แก่นจันทร์	34.96 c	30.90 a	0.33 b	0.020 a	0.08 ab	10.98 a
สุพรรณบุรี 90	33.06 bc	31.38 a	0.35 b	0.000 a	0.10 bc	10.86 a
เจียงพัทลุง	33.45 bc	30.44 a	0.39 bc	0.020 a	0.10 cd	10.97 a
เล็บมือนาง 111	29.31 ab	30.02 a	0.39 bc	0.025 a	0.11 cd	10.78 a
ปทุมธานี 60	32.91 bc	30.21 a	0.39 bc	0.017 a	0.11 cd	11.98 c
ปราจีนบุรี 1	30.54 abc	31.08 a	0.40 bc	0.006 a	0.12 d	11.00 a
ชัยนาท 1	32.31 bc	32.81 a	0.47 c	0.000 a	0.11 cd	10.81 a
พลาญงามปราจีนบุรี	35.63 c	29.13 a	0.48 c	0.003 a	0.12 d	11.57 b

หมายเหตุ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DMRT โดยตัวอักษรที่ต่างกันในแนวดิ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

การคัดเลือกพันธุ์ข้าวที่จะนำไปทำการขึ้นรูปฟิล์ม และวิเคราะห์สมบัติเชิงหน้าที่อื่นๆต่อไป ใช้เกณฑ์จากค่าการวิเคราะห์ทางสถิติของระดับ AM ที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ที่มาจากการวิเคราะห์โดยใช้ iodine binding และ Con A สรุปได้ว่าสามารถเลือกพันธุ์ข้าวได้ 7 สายพันธุ์ ที่มีค่า AM สูง แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ เจียงพัทลุง, แก่นจันทร์, สุพรรณบุรี 90, ปทุมธานี 60, สุพรรณบุรี 1, ปราจีนบุรี 1 และชัยนาท 1

สมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งและสตรัซข้าวไทย

การสกัดสตรัซข้าวโดยวิธีการใช้สารละลายเบสอาจมีผลทำให้ระดับความเป็นผลึก (degree of crystallinity) ของสตรัซลดลงเล็กน้อย โดยอุณหภูมิเจลาติไนซ์ (To, Tp และ Tc) ของสตรัซมีค่าต่ำกว่าแป้งข้าวเจ้า ประมาณ 0.38 องศาเซลเซียส และผลต่างของ Tc และ To สตรัซสูงกว่าแป้ง (ตารางที่ 3 และ 4) แสดงให้เห็นถึงลักษณะความเป็นผลึกระดับเดียวกัน (uniformity) ของสตรัซต่ำกว่าแป้งข้าวเจ้า ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Iturriaga *et al.*, (2004) อย่างไรก็ตามค่าเอนทาลปีของสตรัซข้าวที่มีค่าสูง (ประมาณ 9.8 – 14.4 จูลต่อกรัม) แสดงให้เห็นว่าสตรัซแกรนูลไม่มีการเสียหาย (damaged) เกิดขึ้นมากเกินไป การที่ค่าเอนทาลปีของสตรัซสูงกว่าแป้งข้าว ทั้งที่อุณหภูมิ เจลาติไนซ์ในเซชันต่ำกว่านั้น อาจเป็นไปได้เนื่องจากร้อยละของสตรัซในตัวอย่างสตรัซบริสุทธิ์สูงกว่าร้อยละของสตรัซในตัวอย่างแป้งที่มีองค์ประกอบเคมีอื่นเจือปนอยู่ นอกจากนี้เอนทาลปีเป็นค่าที่บอกถึงการสูญเสียความเป็นระเบียบของเกลียวม้วนคู่ (double-helical order) ของตัวอย่าง ในขณะที่ To เป็นค่าที่บอกถึงระดับความเป็นผลึกของสตรัซแกรนูล (Cooke and Gidley, 1992, Shi and Seib, 1992)

ตารางที่ 3 สมบัติเชิงเคมีฟิสิกส์ของแป้งข้าวเจ้า

พันธุ์ข้าว	อุณหภูมิเจลาติไนซ์ในเซชัน (gelatinization temperature)				เอนทาลปี (จูล/กรัม)
	To (°C)	Tp (°C)	Tc (°C)	Tc – To (°C)	
เจียวกู่หลาน	70.35c	73.99c	77.44c	7.09a	11.93c
แก่นจันทร์	70.41c	74.21c	78.20cd	7.79ab	12.41c
สุพรรณบุรี 90	60.96b	66.26b	71.53ab	10.57c	9.43a
ปทุมธานี 60	60.63b	66.27b	72.29b	11.66d	9.52a
สุพรรณบุรี 1	71.09d	74.58cd	78.96de	7.87ab	13.72bc
ปราจีนบุรี 1	58.92a	64.70a	70.64a	11.72d	10.34ab
ชัยนาท 1	71.13d	75.22d	79.39e	8.25b	11.76c

หมายเหตุ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DMRT โดยตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 4 สมบัติเชิงเคมีฟิสิกส์และสมบัติเชิงกายภาพของสตรัซข้าวเจ้า

พันธุ์ข้าว	อุณหภูมิเจลาติไนเซชัน (gelatinization temperature)				เอนทาลปี (จูล/กรัม)	สมบัติการ พองตัวที่ 120 °ซ	สมบัติการ ละลายที่ 120 °ซ
	To (°ซ)	Tp (°ซ)	Tc (°ซ)	Tc – To (°ซ)		(ร้อยละ)	(ร้อยละ)
เจียงพัทลุง	69.50 d	73.61 d	77.73 d	8.24a	13.77 bcd	30.61 d	21.49 b
แก่นจันทน์	69.70 d	73.69 d	77.96 d	8.25a	14.46 d	33.31 e	23.09 c
สุพรรณบุรี 90	60.65 c	65.89 c	70.88 b	10.23b	11.94 abc	22.67 a	29.68 f
ปทุมธานี 60	60.21 b	65.49 b	71.42 c	11.21c	11.58 ab	26.09 b	19.41 a
สุพรรณบุรี 1	70.55 e	74.45 e	78.82 e	8.26a	13.72 bcd	28.82 c	28.72 e
ปราจีนบุรี 1	59.11 a	64.08 a	69.33 a	10.22b	9.85 a	26.92 b	21.41 b
ชัยนาท 1	70.41 e	74.53 e	79.08 e	8.67a	14.10 cd	31.41 d	23.97 d

หมายเหตุ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DMRT โดยตัวอักษรที่ต่างกันในแนวดิ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

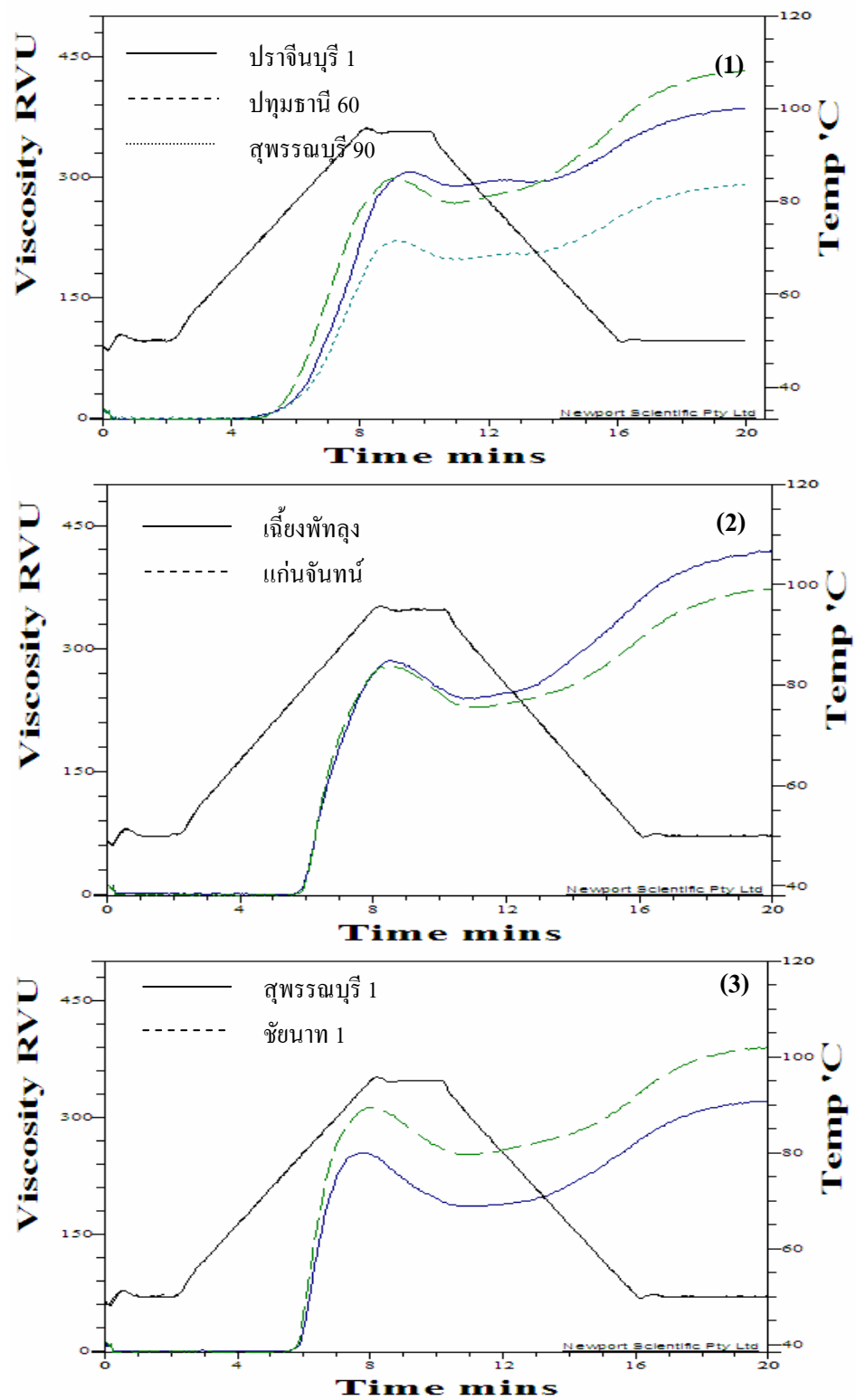
การจัดกลุ่มสตรัซข้าวไทย AM สูงตามอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนซ์ตามหลักการของ Juliano (1998) พบว่าสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีค่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ต่ำ (Tp มีค่าน้อยกว่า 70 องศาเซลเซียส) โดยพบว่าข้าวกลุ่มนี้คือปราจีนบุรี 1, ปทุมธานี 60 และสุพรรณบุรี 90 สำหรับกลุ่มที่ 2 คือสตรัซที่มีค่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ปานกลาง (Tp มีค่าระหว่าง 70 - 74 องศาเซลเซียส) คือพันธุ์เจียงพัทลุง และแก่นจันทน์ กลุ่มที่มีค่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์สูง (Tp มีค่ามากกว่า 74 องศาเซลเซียส) คือ พันธุ์สุพรรณบุรี 1 และชัยนาท 1 โดยอุณหภูมิเจลาติไนซ์ของข้าวทั้งสามกลุ่ม สอดคล้องกับค่าวิเคราะห์ที่รายงานไว้โดยมีแนวโน้มของข้าวแต่ละกลุ่มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน รวมถึงผลต่างระหว่าง Tc และ To ของสตรัซข้าวที่มีอุณหภูมิเจลาติไนซ์ต่ำมีค่ามากกว่าสตรัซข้าวที่มีอุณหภูมิเจลาติไนซ์สูง (ตารางที่ 4) (Vandeputte *et al.*, 2003a) อย่างไรก็ตามค่าเอนทาลปี และ Tc – To ของงานวิจัยนี้ มีค่าต่ำกว่าที่รายงานไว้ประมาณ 3 – 7 จูลต่อกรัม และ 2 – 7 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างของอัตราการให้ความร้อน, ปริมาณสตรัซและปริมาณน้ำที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ระหว่าง 10 องศาอนาที่ กับ 4 องศาอนาที่, ระหว่าง

3 มิลลิกรัม ต่อ 5 – 6 มิลลิกรัม น้ำหนักแห้ง และระหว่าง 7.5 ไมโครลิตร ต่อ 5 ไมโครลิตร ตามลำดับ)

ถึงแม้ว่าปัจจัยที่ควบคุมระดับอุณหภูมิเจลาทีไนซ์และค่าเอนทัลปีจะไม่ใช่อปัจจัยเดียวกัน ดังที่กล่าวมาเบื้องต้น (Cooke and Gidley, 1992) Singh *et al.* (2006) ได้รายงานถึงความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างอุณหภูมิเจลาทีไนซ์ (T_o , T_p และ T_c) และค่าเอนทัลปี (ΔH) ของข้าวเจ้าอินดิกา 19 พันธุ์ (AM ร้อยละ 4-16) ($r = 0.582$, 0.625 และ 0.651 ตามลำดับที่ระดับ $P < 0.01$) ซึ่งในงานวิจัยปัจจุบันได้พบความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกันโดย T_o , T_p และ T_c ของข้าวไทยมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับค่าเอนทัลปี ($r = 0.875$, 0.880 และ 0.890 ตามลำดับที่ระดับ $P < 0.01$) ซึ่งอาจกล่าวได้ในกรณีนี้ว่า สตาร์ชข้าวไทย AM สูงที่มีค่าอุณหภูมิเจลาทีไนซ์สูง มีแนวโน้มที่มีระดับความเป็นผลึกสูงไปด้วย

สมบัติการพองตัวและการละลาย

วัตถุประสงค์หนึ่งของงานวิจัยนี้ คือ เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างการพองตัวของสตาร์ชและสมบัติทางกลของฟิล์ม และเนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มในงานวิจัยนี้ กระทำที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส การวัดกำลังการพองตัว และสมบัติการละลายของสตาร์ช จึงกระทำที่อุณหภูมิเดียวกัน ตารางที่ 4 แสดงถึงความแตกต่างของสมบัติการพองตัว และการละลายของสตาร์ชข้าวโดยโดยสมบัติการพองตัวของสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์แก่นจันทร์ มีค่ามากที่สุด (ร้อยละ 33.31) และพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีค่าต่ำสุด (ร้อยละ 22.67) ส่วนสมบัติการละลายพบว่าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีค่ามากที่สุด (ร้อยละ 29.68) และพันธุ์ปทุมธานี 60 มีค่าต่ำสุด (ร้อยละ 19.41) ค่าสมบัติการพองตัวและการละลายนี้มีค่าสูงกว่าที่รายงานไว้ทั่วไป (Vandeputte, 2003b) เพราะเป็นการให้ความร้อนที่ระดับสูงกว่า 90 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการทำลายโครงสร้างของสตาร์ชมาก ส่งผลให้ส่วนของ AM และ AP เกิดการละลายและการพองตัวมากกว่าปกติ ทำให้ค่าที่วัดได้มีค่ามาก อย่างไรก็ตามผลวิเคราะห์ทางสถิติแสดงว่าไม่มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ระหว่างสมบัติทางกลของฟิล์มและสมบัติการพองตัวและการละลายของสตาร์ช



ภาพที่ 4 รูปแบบของลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาρχ้าวไทย

(1) ค่าอุณหภูมิเจลาตินเซชันต่ำ (2) ปานกลาง และ (3) สูง

สมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืด

รูปแบบของลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชข้าวไทยที่แสดงในภาพที่ 4 แสดงถึงลักษณะเฉพาะของสตาร์ช AM สูงกล่าวคือ มีค่าความหนืดสูงสุด (pasting peak) ต่ำ และค่าการคืนตัวสูง ดังที่มีผู้รายงานไว้คือ Allahgholipour *et al.* (2006) เมื่อพิจารณาลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชตามกลุ่มอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีโนส พบว่าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 และปราจีนบุรี 1 (ภาพที่ 4(1)) หรือข้าวกลุ่มอุณหภูมิเจลลิตีโนสชั้นต่ำ มีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่คล้ายคลึงกับ cross-linked สตาร์ช อย่างไรก็ตาม ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของปราจีนบุรี 1 มีค่าสูงกว่าสุพรรณ 90 เสมอ สำหรับปทุมธานี 60 ไม่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดแบบ cross-linked สตาร์ช แต่มีอัตราการเพิ่มค่าความหนืดในช่วงทำให้เย็นสูงกว่า ปราจีนบุรี 1 และสุพรรณ 90 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สำหรับเจียงพัทลุง และแก่นจันทร์ ซึ่งเป็นข้าวในกลุ่มอุณหภูมิเจลลิตีโนสชั้นปานกลาง (ภาพที่ 4(2)) และสุพรรณบุรี 1 และชัยนาท 1 ซึ่งเป็นข้าวกลุ่มอุณหภูมิเจลลิตีโนสชั้นสูง (ภาพที่ 4(3)) แต่มีปริมาณ AM ใกล้เคียงกัน ยังคงมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงความหนืดจากสตาร์ชข้าวที่แตกต่างเช่นกัน

ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงความหนืดจากสตาร์ชข้าวที่แตกต่างกันนั้น แสดงให้เห็นว่าระดับ AM ไม่ใช่เป็นเพียงปัจจัยหลักปัจจัยเดียวที่มีผลต่อลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Han and Hamaker (2001) ที่รายงานไว้ว่าสตาร์ชข้าวที่มีระดับ AM ใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 15 – 17) มีรูปแบบของลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่แตกต่างกันที่โดยทั่วไปลักษณะของกราฟ RVA ของสตาร์ชข้าวมีลักษณะเป็นแบบขนาน (parallel) ซึ่งกราฟในการทดลองนี้ มีลักษณะดังกล่าว ยกเว้น พันธุ์เจียงพัทลุง, แก่นจันทร์ และปทุมธานี 60 ซึ่งพันธุ์ปทุมธานี 60 มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่ไม่ขนาน (non-parallel) มากที่สุด นอกจากนี้ พันธุ์ปทุมธานี 60 มีค่า peak viscosity ต่ำ แต่อัตราส่วนในการเกิด setback รวมถึงค่า Final viscosity มากกว่าพันธุ์ปราจีนบุรี 1 (ตารางที่ 6) แสดงให้เห็นว่าปทุมธานี 60 มีอัตราการจัดเรียงโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายของเจล และการจัดเรียงโมเลกุลให้มีความเป็นระเบียบเร็วกว่าปราจีนบุรี 1 นอกจากนี้สตาร์ชเพส (paste) ปทุมธานี 60 ยังมีความแข็งแรงมากกว่าปราจีนบุรี 1 อีกด้วย เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชข้าวไทยทั้ง 7 พันธุ์ พบว่าสตาร์ชข้าวเจ้า พันธุ์สุพรรณบุรี 90 และ สุพรรณบุรี 1 มีค่า peak viscosity (221 และ 255 RVU ตามลำดับ) และค่า setback (101 และ 136 RVU ตามลำดับ) ต่ำ

โครงสร้างละเอียดของสตาร์ชข้าว

ในงานวิจัยนี้การวิเคราะห์มวลโมเลกุลของสตาร์ชข้าวไทย AM สูง กระทำโดย 3 วิธี ได้แก่ การคำนวณความยาวโมเลกุลเฉลี่ย โดยใช้วิธีการวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของวิธี Park&Johnson ของตัวอย่างสตาร์ชโดยตรง ($\overline{DPn}$ ของสตาร์ช) การแยก AM และ AP ออกจากกัน โดยวิธี SEC และ คำนวณค่าน้ำหนักโมเลกุลของตัวอย่างโดยเทียบกับค่าน้ำหนักโมเลกุลของซุดพุลลูแลนมาตรฐาน และการคำนวณหาค่าน้ำหนักโมเลกุลของสตาร์ชโดยรวมโดยใช้สูตรคำนวณจากปริมาณของ AM และ AP (Park *et al.*, 2007) (ตารางที่ 5) จากการสำรวจเอกสารยังไม่พบรายงานการวัด Mw สตาร์ช โดยวิธีของ Park and Johnson (Hizukuri, 1986) โดยที่ไม่มีการแยก AM และ AP ออกจากกันก่อน

ตารางที่ 5 โครงสร้างละเอียดของสตาร์ชของข้าวเจ้าไทยแอมิโลสสูง

พันธุ์ข้าว	สตาร์ช				แอมิโลส		แอมิโลเพกทิน	
	วัดโดยตรง		คำนวณตามสมการ		คำนวณจาก SEC		คำนวณจาก SEC	
	$\overline{DPn}$	$\overline{Mn}$	$\overline{DPn}$	$\overline{Mn}$	$\overline{DPn}$	$\overline{Mn}$	$\overline{DPn}$	$\overline{Mn}$
เจียวก่ำพันธุ์	4,919c	7.97×10^5 c	19,890	3.20×10^6	871bc	1.41×10^5 bc	28,042	4.54×10^6
แก่นจันทร์	2,856a	4.63×10^5 a	21,635	3.46×10^6	669ab	1.08×10^5 ab	30,620	4.96×10^6
สุพรรณบุรี 90	2,347a	3.80×10^5 a	20,799	3.29×10^6	761ab	1.13×10^5 ab	29,388	4.74×10^6
ปทุมธานี 60	2,759a	4.47×10^5 a	22,774	3.67×10^6	1,039c	1.68×10^5 c	32,090	5.18×10^6
สุพรรณบุรี 1	2,721a	4.41×10^5 a	19,100	2.90×10^6	871bc	1.41×10^5 c	26,913	4.34×10^6
ปราจีนบุรี 1	3,930b	6.37×10^5 b	19,040	3.02×10^6	669ab	1.08×10^5 ab	26,913	4.34×10^6
ชัยนาท 1	5,269c	8.54×10^5 c	22,631	3.51×10^6	561a	9.06×10^4 a	32,090	5.18×10^6

หมายเหตุ คำนวณค่า $\overline{DPn} = \overline{Mn} / 162$

เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DMRT โดยตัวอักษรที่ต่างกันในแนวดิ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จะเห็นว่าน้ำหนักโมเลกุลของสตาร์ชที่วัดโดยวิธีวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ Park&Johnson โดยตรงมีค่าอยู่ในช่วง $3.80 - 8.54 \times 10^5$ ดาลตัน ซึ่งต่ำกว่าน้ำหนักโมเลกุลสตาร์ชที่ได้จากการคำนวณตามสมการ ($3.07 - 3.68 \times 10^6$ ดาลตัน) และต่ำกว่าน้ำหนักโมเลกุลของ AP

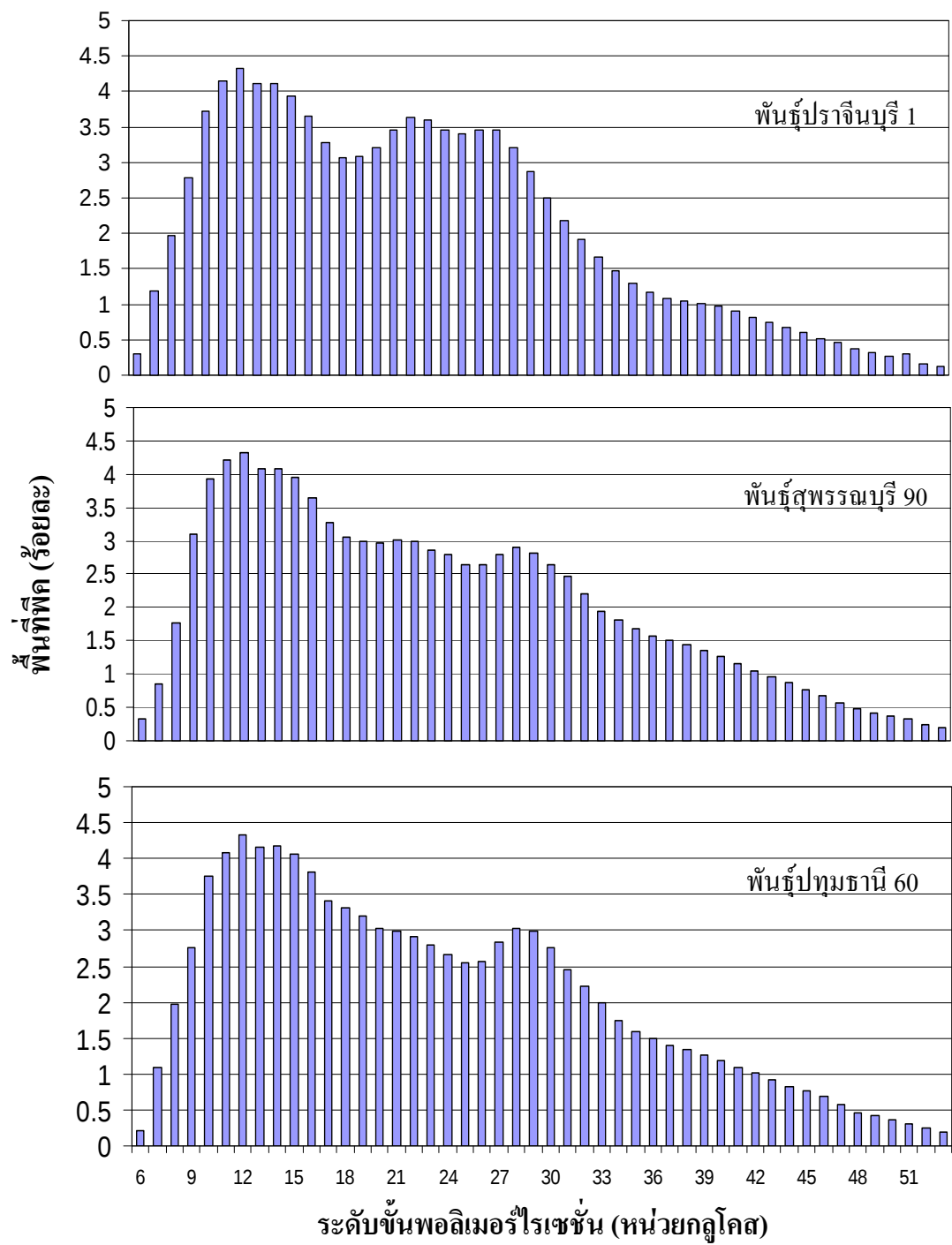
($4.34 - 5.18 \times 10^6$ คาลตัน) ซึ่ง Park *et al.* (2007) ได้รายงานผลการทดลองที่มีแนวโน้มคล้ายคลึงกัน แต่น้ำหนักโมเลกุลของสตาร์ชข้าวที่ได้รายงานไว้มีค่า $0.52 - 1.96 \times 10^8$ คาลตัน เนื่องจากการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลในงานดังกล่าวใช้ static multi-angle laser light scattering (MALLS) เป็นตัววัดน้ำหนักโมเลกุลซึ่ง Takeda *et al.* (2003) ได้รายงานไว้ถึงความแตกต่างของมวลโมเลกุลเมื่อใช้วิธีของ Park and Johnson (Hizukuri, 1986) และวิธี MALLS ว่าน้ำหนักโมเลกุลของสตาร์ชจะมีความแตกต่างกัน โดย $\overline{M}_n$ ของสตาร์ชจากวิธีแรกมีค่าอยู่ระหว่าง $0.76 - 2.40 \times 10^6$ คาลตัน ขณะที่ $\overline{M}_n$ ของวิธีที่สองจะมีค่าอยู่ระหว่าง $0.10 - 13.9 \times 10^8$ คาลตัน หรือแตกต่างกันประมาณ $0.92 \times 10^7 - 1.37 \times 10^8$ คาลตัน หรืออีกนัยหนึ่งคือ น้ำหนักโมเลกุลสตาร์ชมีการกระจายตัวสูง

น้ำหนักโมเลกุล AM ของข้าวไทย AM สูงทั้ง 7 พันธุ์ มีค่าประมาณ $9.06 \times 10^4 - 1.68 \times 10^5$ คาลตัน หรือคิดเป็นค่า $\overline{DP}_n$ เฉลี่ย $561 - 1,039$ AGU ซึ่งอยู่ในพิสัยที่ต่ำกว่าที่รายงานไว้เล็กน้อย (Hanashiro and Takeda, 1998) ($\overline{DP}_n$ 1,190 – 1,410 AGU) ข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาท 1 และปทุมธานี 60 มีค่า $\overline{DP}_n$ ต่ำที่สุดและสูงที่สุด (561 และ 1,039 AGU) ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5

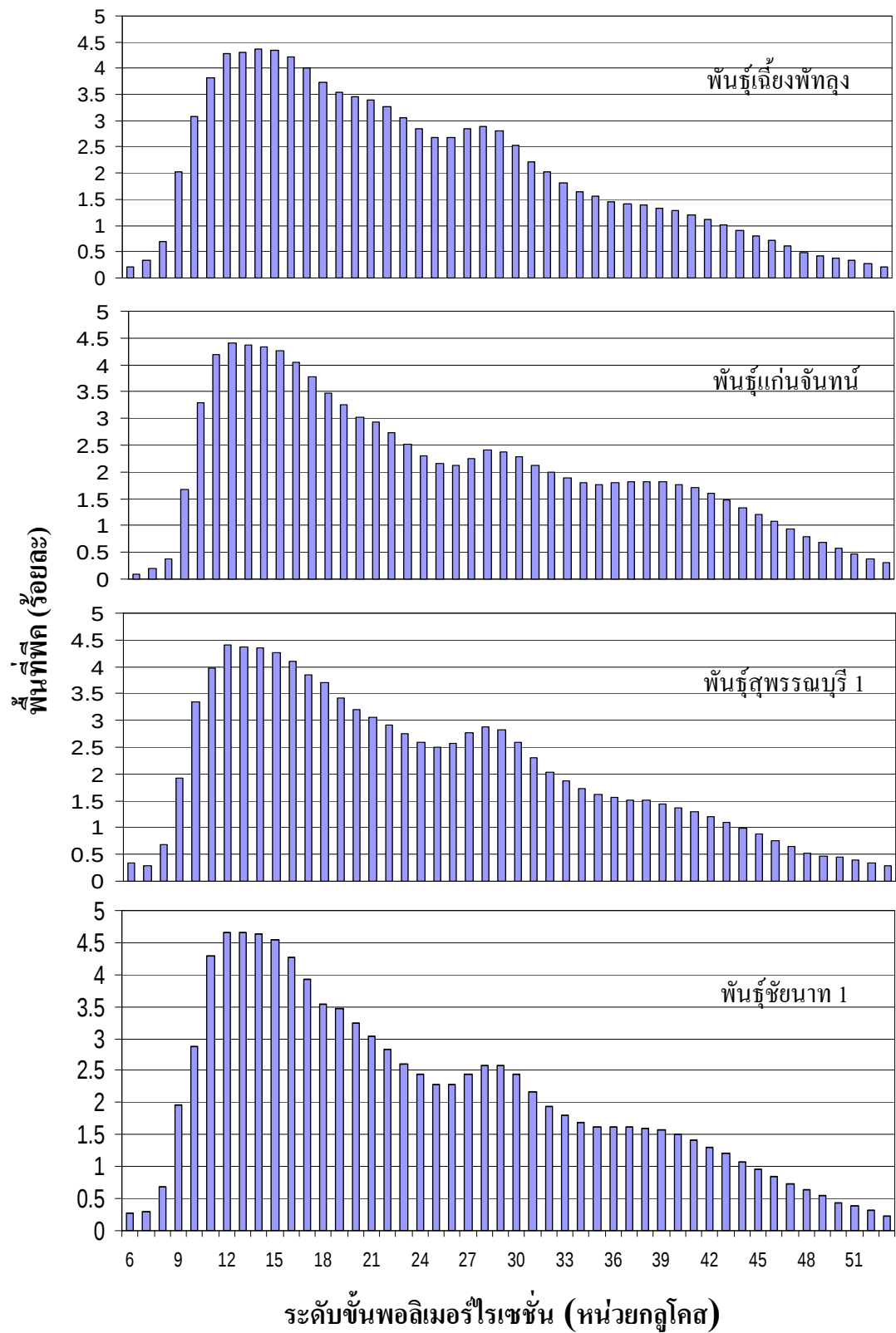
Hizukuri *et al.* (1989) และ Takeda *et al.* (1986) รายงานค่า $\overline{DP}_n$ ของ AP ที่วิเคราะห์จากวิธีของ Park and Johnson (Hizukuri, 1986) ว่ามีค่าอยู่ในช่วง $0.47 - 1.5 \times 10^4$ คาลตัน และ $\overline{DP}_n$ ของ AP ของข้าวเจ้า sub-species อินดิกา มีค่า 2,700 – 2,900 (Lu *et al.*, 1997) ขณะที่ Takeda *et al.* (2003) พบว่า AP ของข้าวเจ้า sub-species อินดิกา มีค่า $\overline{DP}_n$ 1.1×10^4 AGU เมื่อทำการวิเคราะห์โดยใช้ fluorescent labeling จากผลการทดลองปรากฏว่าเมื่อใช้วิธีวิเคราะห์ด้วย low pressure GPC และเปรียบเทียบกับน้ำหนักโมเลกุลของพอลิกลูแลนมาตรฐาน สตาร์ชข้าวไทย AM สูงมีมวลโมเลกุลของ AP เท่ากับ $4.34 - 5.18 \times 10^6$ คาลตัน โดยสุพรรณ 1 และปราจีนบุรี 1 มีมวลโมเลกุลต่ำสุด (4.34×10^6 คาลตัน) ขณะที่ปทุมธานี 60 และชัยนาท 1 มีมวลโมเลกุลสูงสุด (5.18×10^6 คาลตัน)

ลักษณะการกระจายตัวของสายโซ่ของปริมาณแอมิโลเพกทินสัมพันธ์ในข้าวแอมิโลสสูง

ข้าวทุกสายพันธุ์ในงานวิจัยนี้มีค่าร้อยละพื้นที่สูงสุดที่ $\overline{CLn}$ 12 ซึ่งคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่ได้มีรายงานไว้ Hanashiro *et al.* (1996), Hizukuri (1986), Jane *et al.* (1999) และ Srichuwong *et al.* (2005) แต่มีความแตกต่างคือโครมาโตแกรมมีไหล่หรือหลุมที่ $\overline{CLn}$ 18 หรือ 19 ทั้งนี้อาจเนื่องจากเป็นลักษณะเฉพาะของข้าวเจ้าไทย AM สูง การกระจายตัวของสายโซ่ของปริมาณ AP สัมพัทธ์ของข้าวไทยตั้งแต่ $\overline{CLn}$ 6 ถึง $\overline{CLn}$ 53 (ภาพที่ 5) มีความแตกต่างกันโดยกราฟของข้าวส่วนใหญ่มีลักษณะเป็น 3 พีค (trimodal distribution) (F_1 : $\overline{CL}$ 6 -25, F_2 : $\overline{CL}$ 26 – 36 และ F_3 : $\overline{CL}$ 37 – 53) ยกเว้น ปทุมธานี 60 ที่มีลักษณะเป็น 2 พีค (bimodal distribution) (F_1 : $\overline{CL}$ 6 -25 และ F_2 : $\overline{CL}$ 26 – 53) ปราจีนบุรี 1 และสุพรรณ 90 เป็น 4 พีค (quartermodal distribution) (F_1 : $\overline{CL}$ 6 -19, F_2 : $\overline{CL}$ 19 - 25, F_3 : $\overline{CL}$ 26 – 36 และ F_4 : $\overline{CL}$ 37 – 53) (ภาพที่ 5) ซึ่งลักษณะของฮิสโทแกรมของข้าวตัวอย่างแตกต่างกับที่ฮิสโทแกรมของปริมาณ AP สัมพัทธ์ของข้าว (Vandeputte *et al.*, 2003a) และฮิสโทแกรม AP ของข้าว (Hanashiro *et al.*, 1996) ที่รายงานไว้ว่าเป็นลักษณะการกระจายตัวแบบพีคเดียว (single modal distribution) ซึ่งความแตกต่างของลักษณะการกระจายตัวของสายโซ่ดังกล่าวอาจมาจากตัวอย่างพันธุ์ข้าวที่ต่างกันหรือการที่ไม่ได้แยก AP ออกจากสตาร์ช ก่อนนำมาทำการย่อยตัดความเป็นกิ่งก้านของตัวอย่าง ซึ่งจะต้องทำการศึกษาต่อไป



ภาพที่ 5 การกระจายตัวของสายโซ่ของสตาร์ชข้าวแอมิโลสสูงย่อยด้วยเอนไซม์ไอโซแอมิเลส



ภาพที่ 5 (ต่อ)

ตารางที่ 6 เป็นตารางแสดงถึงร้อยละการกระจายตัวของสายโซ่ของสตาร์ชข้าว AM สูง โดยแบ่งกลุ่มการกระจายตัวตามหลักการของ Hanashiro *et al.* (1996) ได้เป็นกลุ่มสายโซ่สั้น (A : $\overline{DP}$ 6 - 12) มีพื้นที่ประมาณร้อยละ 14.6 – 18.3 กลุ่มสายโซ่ B_1 ($\overline{DP}$ 12 - 24) มีพื้นที่ประมาณร้อยละ 39.8 – 44.8 กลุ่มสายโซ่ B_2 ($\overline{DP}$ 25 - 36) มีพื้นที่ประมาณร้อยละ 25.3 – 28.5 และกลุ่มสายโซ่ B_3 ($\overline{DP}$ 36 - 53) มีพื้นที่ประมาณร้อยละ 10.5 – 19.9 ตามลำดับ โดยการกระจายตัวของสายโซ่ของ AP ของสตาร์ชข้าวอินดิกา (AM ร้อยละ 25) ในงานวิจัยของ Jane *et al.* (1999) กลุ่มสายโซ่สั้น (A : $\overline{DP}$ 6 - 12) มีพื้นที่ร้อยละ 19 กลุ่มสายโซ่ B_1 ($\overline{DP}$ 12 - 24) มีพื้นที่ร้อยละ 52.2 กลุ่มสายโซ่ B_2 ($\overline{DP}$ 25 - 36) มีพื้นที่ร้อยละ 12.3 และกลุ่มสายโซ่ B_3 ($\overline{DP}$ 36 - 53) มีพื้นที่ร้อยละ 16.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 6 ความเป็นกึ่งก้านและการกระจายตัวของสายโซ่ของสตาร์ชข้าว

พันธุ์ข้าว	β -amylolysis (ร้อยละ)	CLn	ECL	ICL	Branch chain length distribution (ร้อยละ)			
					A*	B_1 *	B_2 *	B_3 *
		**	***	****				
เจียวกู่พันธุ์	63.12 abc	23.97bc	17.1c	5.8c	14.76a	44.84c	26.52bc	13.89b
แก่นจันทร์	62.17 abc	25.44d	17.8c	6.6e	14.56a	40.21a	25.29a	19.95d
สุพรรณบุรี 90	60.82 ab	23.76b	16.5b	6.3d	18.26b	39.81a	28.39d	13.55b
ปทุมธานี 60	58.70 a	24.08bc	16.1a	6.9f	17.62b	40.29a	26.96c	15.14bc
สุพรรณบุรี 1	65.36 bcd	24.23bc	17.8c	5.4b	15.08a	43.05b	27.14c	14.74bc
ปราจีนบุรี 1	67.28 cd	22.99a	17.5d	4.5a	18.05b	42.94b	28.53d	10.49a
ชัยนาท 1	69.20 d	24.39c	18.9f	4.5a	15.23a	43.01b	25.69ab	16.08c

หมายเหตุ * $A = \overline{DP} 6 - 12$, $B_1 = \overline{DP} 12 - 24$, $B_2 = \overline{DP} 25 - 36$ และ $B_3 = \overline{DP} > 37$

** $\overline{CLn} = \frac{(\text{มีขยฐาน}A \times A) + (\text{มีขยฐาน}B_1 \times B_1) + (\text{มีขยฐาน}B_2 \times B_2) + (\text{มีขยฐาน}B_3 \times B_3)}{100}$

100

*** $\overline{ECL} = (\overline{CLn} \times \% \text{ beta-amylolysis}) + 2$

**** $\overline{ICL} = (\overline{CLn} - \overline{ECL}) - 1$

สตาร์ชข้าวไทย AM สูง มีค่า ร้อยละปีตาแอมิโลไลซิสอยู่ในช่วงร้อยละ 58 -69 โดย ปทุมธานี 60 และชัยนาท 1 เป็นข้าวที่มีลักษณะโมเลกุลเป็นเส้นตรงน้อยและมากที่สุด ตามลำดับ ค่าความยาวสายโซ่เฉลี่ย ($\overline{CLn}$) ของสตาร์ชข้าวไทยของงานวิจัยนี้มีค่า 22.99 – 25.44 AGU ซึ่ง

มากกว่า $\overline{CLn}$ ของ AP ข้าว sub-species อินдика AM สูง ของไต้หวัน 3 พันธุ์มีค่า $\overline{CLn}$ ของแอมิโลเพกทินอยู่ในช่วง 20.2 – 22.1 AGU (Lu *et al.*, 1997) ในส่วนของข้าว sub-species อินдика 3 พันธุ์ปลูกในประเทศสหรัฐอเมริกา มีปริมาณ AM อยู่ในช่วงร้อยละ 21 – 23 และมีค่า $\overline{CLn}$ ของแอมิโลเพกทินเท่ากับ 21 – 23 AGU (Patindol and Wang, 2002) นอกจากนี้มีงานวิจัยของ Jane *et al.* (1999) แสดงค่า $\overline{CLn}$ ของ AP ของสตาร์ชข้าวมีค่าเท่ากับ 18.8 - 22.7 AGU

สมบัติทางกลของสตาร์ชข้าวไทยแอมิโลสูง

สตาร์ชฟิล์มข้าวที่ใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบ casting มีค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ประมาณ 8.95 เมกะพาสคาล โดยค่าดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมชนิดและปริมาณพลาสติกไซเซอรที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ฟิล์มสตาร์ชข้าวมีร้อยละการยืดตัว (% elongation) มีค่าใกล้เคียงศูนย์ เมื่อระบบไม่มีการเติมพลาสติกไซเซอรเลย (Laohakunjit and Noomhorm, 2004) ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยต้องการศึกษาสมบัติทางกลของฟิล์มสตาร์ชข้าวที่มีความสามารถในการยืดตัวได้ให้มีความใกล้เคียงกับการนำฟิล์มไปใช้ประโยชน์ได้จริง และเพื่อจำกัดอิทธิพลของชนิดพลาสติกไซเซอรที่แตกต่างกัน จึงทำการขึ้นรูปฟิล์มโดยเลือกกลีเซอรอลซึ่งเป็นพลาสติกไซเซอรที่ใช้กันทั่วไป และกำหนดระดับการเติมกลีเซอรอลที่ร้อยละ 50 ของน้ำหนักสตาร์ช ตามงาน Mehyar and Han (2004) อย่างไรก็ตามสมบัติทางกลของฟิล์มจากสตาร์ชข้าวไทย AM ในการศึกษาครั้งนี้ยังคงมีความแตกต่างสมบัติทางกลของฟิล์มจากที่รายงานไว้ Mehyar and Han (2004) โดยมีค่าการต้านทานแรงดึง 3.2 เมกะพาสคาล และการยืดตัวเท่ากับร้อยละ 265 ที่สภาวะทดสอบความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 51 โดยแอมิโลสของข้าวที่ใช้ในการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน (AM ร้อยละ 30) ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะสภาวะในการเตรียมฟิล์มซึ่งใช้อุณหภูมิและเวลาน้อยกว่า (100 องศาเซลเซียส, 15 นาที ตามลำดับ) และความแตกต่างของสภาวะที่ใช้ในการทดสอบ รวมทั้งชนิดของข้าวที่ใช้ในการทดลอง

ฟิล์มสตาร์ชข้าว 7 สายพันธุ์ที่มีพลาสติกไซเซอรในอัตราส่วนร้อยละ 50 ของน้ำหนักสตาร์ช และขึ้นรูปด้วยกระบวนการ casting มีความหนา 0.120 – 0.130 มิลลิเมตร ตารางที่ 7 แสดงถึงความแตกต่างของสมบัติทางกลของฟิล์มสตาร์ช ทั้งที่ระดับ AM ของสตาร์ชไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) จึงอาจกล่าวได้ว่าความต้านทานแรงดึงและความสามารถในการยืดตัวของสตาร์ชฟิล์มข้าวไม่ได้ขึ้นกับปริมาณ AM และสภาวะในการขึ้นรูปฟิล์มเท่านั้น อาจมีปัจจัยอื่นที่มีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลของสตาร์ชร่วมด้วย

ตารางที่ 7 สมบัติทางกลของฟิล์มสตาร์ข้าว

พันธุ์ข้าว	ค่าการต้านทานแรงดึง (เมกะพาสคาล)	การยืดตัว (ร้อยละ)	ค่าโมดูลัสของยัง (เมกะพาสคาล)
เลี้ยงพัทลุง	2.50d	34.64a	50 c
แก่นจันทร์	2.20c	41.74b	40 b
สุพรรณบุรี 90	1.63b	44.78b	20 a
ปทุมธานี 60	1.71b	44.74b	20 a
สุพรรณบุรี 1	2.91d	30.88a	70 d
ปราจีนบุรี 1	1.75b	54.84c	20 a
ชัยนาท 1	1.39a	43.08b	20 a

หมายเหตุ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DMRT โดยตัวอักษรที่ต่างกันในแนวดิ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ค่าการต้านทานแรงดึงของฟิล์มที่ขึ้นรูปจากสตาร์อยู่ในช่วง 1.39 – 2.91 เมกะพาสคาล และร้อยละการยืดตัวอยู่ในช่วงร้อยละ 30.88 – 54.84 ตามลำดับ สุพรรณบุรี 1 มีค่าการต้านทานแรงดึงมากที่สุด (2.91 เมกะพาสคาล) ขณะที่ ชัยนาท 1 มีค่าการต้านทานแรงดึงน้อยที่สุด (1.39 เมกะพาสคาล) จากการทดลองนี้ พบว่าเมื่อผลิตฟิล์มจากสตาร์ที่มีระดับ AM ใกล้เคียงกัน ฟิล์มที่มีค่าการต้านทานแรงดึงสูง มักจะมีความสามารถในการยืดตัวได้ต่ำ อย่างไรก็ตาม ฟิล์มที่ผลิตจากสตาร์ข้าวพันธุ์แก่นจันทร์, สุพรรณบุรี 90, ปทุมธานี 60 และชัยนาท 1 มีความสามารถในการยืดตัวไม่แตกต่างกัน (ร้อยละ 41.74 – 44.78) แต่มีความแข็งแรงของฟิล์มที่แตกต่างกัน (1.39 – 2.20 เมกะพาสคาล) เป็นผลให้ฟิล์มบางประเภทมีค่าโมดูลัสของยังเท่ากัน แต่มีความแข็งแรงและการยืดตัวของฟิล์มแตกต่างกันไป ในกลุ่มข้าวที่มีค่าโมดูลัสของยังต่ำสุด (20 เมกะพาสคาล) และสตาร์ชฟิล์มที่เตรียมจากข้าวพันธุ์ปราจีนบุรี 1 เป็นฟิล์มที่มีค่าการยืดตัวสูงที่สุด (ร้อยละ 54.84)

ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างละเอียดและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชข้าว และสมบัติทางกลของสตาร์ชฟิล์ม

ดัชนีบรรยายลักษณะโครงสร้างละเอียดของสตาร์ชข้าวไทย AM สูง ของงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย $\overline{DP_n}$, น้ำหนักโมเลกุล, ร้อยละปีตาเอมิโลไลซิส, $\overline{ECL}$, $\overline{ICL}$ และ การกระจายตัวของ CL อย่างไรก็ตามเมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดังกล่าวและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชรวมถึงสมบัติทางกลของฟิล์มสตาร์ช พบว่าระดับพอลิเมอร์ไรเซชันเฉลี่ย และ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเป็นดัชนีที่ไม่มีความสัมพันธ์ใดกับสมบัติอื่นๆของสตาร์ช หรือ คุณภาพของฟิล์มสตาร์ชที่มีระดับ AM ใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานที่พบว่า $\overline{DP_n}$ และ $\overline{M_n}$ ไม่มีอิทธิพลต่อรูปแบบความหนืดของสตาร์ชข้าว (Patindol and Wang, 2002, Wang and Wang, 2002)

จากผลการวิเคราะห์ (ตารางที่ 8) พบว่า ลักษณะการกระจายตัวของสายโซ่สตาร์ชมีอิทธิพลต่ออุณหภูมิเจลาติไนซ์และค่าเอนทัลปี ตารางที่ 8 แสดงถึงกลุ่มสายโซ่สั้น DP 6 – 9, DP 6- 12 และ อัตราส่วนระหว่าง DP 6 – 12 : DP 6 – 30 ที่มีการจัดแบ่งกลุ่มความยาวสายโซ่ตามหลักการของ Vandeputte, Hanashiro และ Noda มีความสัมพันธ์เชิงลบ และบวก ($r = -0.8, -0.8, -0.8, -0.7$ และ $+0.7, P < 0.05$) กับ T_o , T_p , T_c , ΔH และ $T_c - T_o$ ของสตาร์ช ซึ่งตรงกับที่เคยมีรายงานไว้ (Vandeputte *et al.*, 2003a, Hanashiro *et al.*, 1996 และ Noda *et al.*, 2003) ซึ่ง Gidley and Bulpin (1987) ได้ให้คำอธิบายว่าเมื่อมีปริมาณสายโซ่สั้น ($\overline{DP} < 10$) ปริมาณมากจะขัดขวาง และลดความคงตัวของเกลียวม้วนคู่ของ AP ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันและเอนทัลปีลดลง ในงานวิจัยปัจจุบันยังพบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\overline{DP}$ และสมบัติเชิงความร้อนของสตาร์ชยังคงมีในลักษณะเชิงลบ จนกระทั่งค่า $\overline{DP}$ มีความยาวมากกว่า 33 หรือ มากกว่า 37 ขึ้นไป จากนั้นความสัมพันธ์ระหว่างสายโซ่ยาว $\overline{DP_n}$ (37 - 53) และ อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน และเอนทัลปีจะเป็นไปในทิศทางตรงกันข้าม ($r = 0.6$ และ $0.7, P < 0.05$ ตามลำดับ) และถ้ากล่าวโดยรวม พบว่าความยาวสายโซ่เฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น ($\overline{CL_n}$, และ $\overline{ECL}$) มีผลทำให้ทำให้สมบัติเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นตามอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าว อาจเกิดขึ้นเนื่องจากสายโซ่ที่มีความยาวโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มีมากกว่าหนึ่ง cluster (20 - 24) มีส่วนช่วยในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับความเป็นผลึกของสตาร์ชได้ดี

ตารางที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างสตาresh์ข้าว AM สูง และสมบัติเชิงความร้อนของสตาresh์ข้าว

ความสัมพันธ์	To	Tp	Tc	Tc -To	เอนทาลปี
การแบ่งกลุ่มสายโซ่แบบ Hanashiro <i>et al.</i> (1996)					
DP 6 - 12	-.820 (**)	-.822 (**)	-.828 (**)	.724 (**)	-.731 (**)
DP 25 - 36	-.642 (*)	-.661 (**)	-.685 (**)	.438	-.678 (**)
DP 37 - 53	.634 (*)	.645 (*)	.664 (*)	-.475	.749 (**)
$\overline{\text{CLn}}$	.695 (**)	.702 (**)	.718 (**)	-.557 (*)	.790 (**)
$\overline{\text{ECL}}$	.671 (**)	.661 (*)	.657 (*)	-.663 (**)	.463
การแบ่งกลุ่มสายโซ่แบบ Vandeputte <i>et al.</i> (2003a)					
DP 6 - 9	-.835 (**)	-.837 (**)	-.840 (**)	.746 (**)	-.737 (**)
DP 10 -11	-.655 (*)	-.666 (*)	-.682 (**)	.505	-.592 (*)
DP 23 - 24	-.516	-.540 (*)	-.577 (*)	.262	-.622 (*)
DP 25 - 32	-.645 (*)	-.663 (*)	-.685 (*)	.452	-.747 (**)
DP > 33	.596 (*)	.606 (*)	.621 (*)	.459	.736 (**)
การแบ่งกลุ่มสายโซ่แบบ Noda <i>et al.</i> (2003)					
Ratio DP (6-12)/(6-30)	-.820 (*)	-.822 (*)	-.828 (**)	.725 (**)	-.730 (**)

หมายเหตุ (*) มีความสัมพันธ์ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

(**) มีความสัมพันธ์ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

ทิศทางความสัมพันธ์ส่วนใหญ่ระหว่างการกระจายของลักษณะสายโซ่และการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาresh์ มีความไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดแบ่งกลุ่มสายโซ่ดังแสดงในตารางที่ 9 ยกเว้น กลุ่มสายโซ่สั้น 6 - 9, 6 - 12 และ สัดส่วน 6 - 12 ต่อ 6 - 30 ที่มีความสัมพันธ์เชิงลบกับค่า breakdown และค่า setback ($-0.7, p < 0.01$ และ $-0.5, p < 0.05$ ตามลำดับ) Han and Hamaker (2001) ได้รายงานผลในทางตรงกันข้าม คือ กลุ่มสายโซ่สั้น (DP < 17) มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับ breakdown ($r = 0.89, p < 0.01$) และได้ให้คำอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวไว้ว่ากลุ่มสายโซ่สั้นมีผลให้สตาresh์แกรนูลที่มีการพองตัวมากขึ้นไม่แข็งแรง แตกออกง่าย หรือ ลดรัศมีการแผ่กระจาย (gyration radius) ของโมเลกุล AP ผลที่มีความขัดแย้งกับรายงานดังกล่าวนี้ เกิดขึ้นจากกลุ่ม

ตัวอย่างสตาร์ชข้าว Tp ต่ำ (ปราจีนบุรี 1, ปทุมธานี 60 และ สุพรรณบุรี 90) และแก่นจันทร์ (Tp ปานกลาง) กล่าวคือข้าวที่มี F_1 (A: DP 6 -12) ที่มีค่าร้อยละ 15 มีค่า breakdown ประมาณ 75 RVU ขณะที่ ข้าวที่มี F_1 ร้อยละ 18 มีค่า breakdown ประมาณ 25 RVU (ภาพที่ 4, ตารางที่ 6) และอาจเนื่องมาจากความแตกต่างของชนิดข้าวที่ใช้ในการทดลองโดยมีปริมาณแอมิโลสแตกต่างกัน ซึ่งอยู่ในกลุ่มของข้าวแอมิโลสต่ำ (ปริมาณแอมิโลสร้อยละ 15 - 17) และเป็นพันธุ์ที่ปลูกในประเทศอเมริกา รวมทั้งวิธีการในการวิเคราะห์ดังกล่าวมีการแยกแอมิโลเพกทินบริสุทธิ์เพื่อนำไปวิเคราะห์การกระจายตัวของสายโซ่ด้วย biogel P-10 (ช่วงโมเลกุล 1,500 – 20,000 ดาลตัน) และวิเคราะห์โดยใช้การวัดปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ซึ่งแตกต่างจากการวิเคราะห์การกระจายของสายโซ่โดยใช้เครื่อง HPAEC-PAD ที่มีหลักการวิเคราะห์แตกต่างกัน

ตารางที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างละเอียดของสตาร์ชข้าวเจ้าแอมิโลสสูงกับสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ช

ความสัมพันธ์	Peak	Breakdown	Setback	FinalViscosity
การแบ่งกลุ่มสายโซ่แบบ Hanashiro <i>et al.</i> (1996)				
DP 6 - 12	-.263	-.689 (**)	-.578 (*)	-.230
DP 12 – 24	.553 (*)	.237	.474	.540 (*)
DP 25 – 36	-.285	-.533	-.584 (*)	-.327
DP 37 - 53	-.062	.558 (*)	.327	-.053
การแบ่งกลุ่มสายโซ่แบบ Vandeputte <i>et al.</i> (2003a)				
DP 6 – 9	-.216	-.710 (**)	-.525	-.159
DP 10 -11	-.468	-.558 (*)	-.670 (**)	-.471
DP 12 - 22	.535 (*)	.465	.648(*)	.539(*)
DP 25 - 32	-0.055	-.565 (*)	-.410	-.090
DP > 33	-0.170	.537 (*)	.261	-.174
การแบ่งกลุ่มสายโซ่แบบ Noda <i>et al.</i> (2003)				
Ratio DP (6 – 12)/(6 – 30)	-.259	-.687 (**)	-.572 (*)	-.255

หมายเหตุ (*) มีความสัมพันธ์ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

(**) มีความสัมพันธ์ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

ตารางที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างละเอียดของสตาร์ชข้าวเจ้าเอมิโลสสูงกับสมบัติทางกลของสตาร์ชฟิล์ม

ความสัมพันธ์	ค่าการต้านทานแรงดึง	ร้อยละการยืดตัว	ค่าโมดูลัสของยัง
การแบ่งกลุ่มสายโซ่แบบ Hanashiro <i>et al.</i> (1996)			
DP 6 - 12	-.508 (**)	.612 (**)	-.597 (**)
DP 25 - 36	-.107	.402 (*)	-.211
DP 37 - 53	.141	-.381 (*)	.186
$\overline{\text{CLn}}$	.234	-.441 (*)	.278
$\overline{\text{ECL}}$	.234	-.439 (*)	.278
$\overline{\text{ICL}}$	.234	-.441 (*)	.278
การแบ่งกลุ่มสายโซ่แบบ Vandeputte <i>et al.</i> (2003a)			
DP 6 - 9	-.499 (**)	.601 (**)	-.612 (**)
DP 12 - 22	.342	.398 (*)	.448 (*)
การแบ่งกลุ่มสายโซ่แบบ Noda <i>et al.</i> (2003)			
Ratio DP (6 - 12)/(6 - 30)	-.507 (**)	.610 (**)	-.596 (**)

หมายเหตุ (*) มีความสัมพันธ์ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

(**) มีความสัมพันธ์ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

ร้อยละของกลุ่มสายโซ่สั้น DP 6 - 9 มีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับร้อยละการยืดตัวและลบกับความต้านทานแรงดึงของฟิล์ม และค่าโมดูลัสของยัง ($r = 0.6, -0.5$ และ -0.6 ตามลำดับ, $p < 0.01$) (ตารางที่ 10) เป็นที่ทราบกันดีว่า AM หรือ โมเลกุลที่เป็นสายยาวตรง เป็นพอลิเมอร์ที่ทำให้ความแข็งแรงกับฟิล์มเพราะมีความสามารถในการเกิดครีสมิการแผ่กระจาย เป็นผลให้เกิดแรงยึดเกาะมากภายในฟิล์ม (Banker, 1966) ในงานวิจัยนี้ได้มีการควบคุมระดับ AM ให้คงที่ระดับหนึ่ง ซึ่งเป็นระดับ AM ที่เพียงพอต่อการเกิดโครงสร้างฟิล์มที่มีแข็งแรง ไม่เปราะง่าย และปริมาณสายโซ่สั้นหรือความเป็นกิ่งของ AP อาจไปรบกวนความสามารถในการจัดเรียงตัวกันระหว่างโมเลกุลที่เป็นสายยาวลดลงบ้าง ดังนั้นจำนวนที่เพิ่มมากขึ้นของพอลิเมอร์สายโซ่สั้น จึงมีผลทำให้ค่า tensile strength ของฟิล์มลดลง แต่ร้อยละของการยืดตัว (% elongation) ของฟิล์มเพิ่มขึ้น เพราะกลุ่มสาย

โซ่สั้นทำให้การจัดเรียงตัวระหว่างชั้นโมเลกุลไม่ยึดแน่นจนเกินไป ทำให้ความสามารถยึดตัวได้เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงเคมีฟิสิกส์ของสตาร์ชข้าวเจ้าแอมิโลสสูงกับสมบัติทางกลของสตาร์ชฟิล์ม

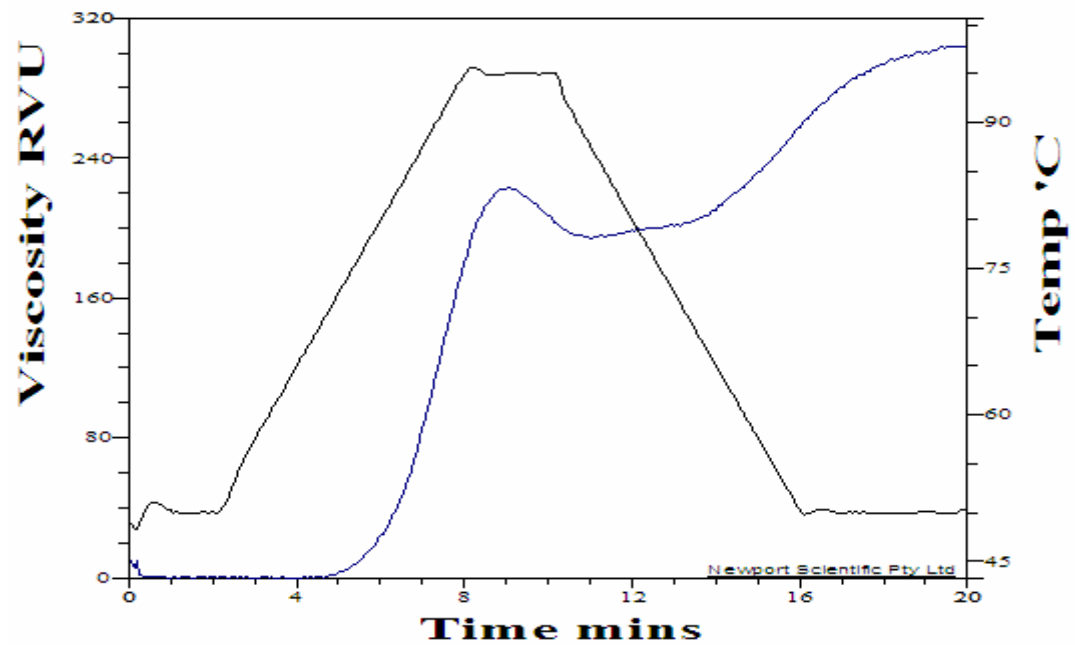
ความสัมพันธ์	ค่าการต้านทานแรงดึง	ร้อยละการยืดตัว	ค่าโมดูลัสของยัง
To	.504	-.793 (**)	.692 (**)
Tp	.491	-.795 (**)	.683 (**)
Tc	.468	-.806 (**)	.666 (**)
เอนทาลปี	.371	-.809 (**)	.518
Trough	-.518	.572 (*)	-.501
Breakdown	.446	-.769 (**)	.633 (*)
Final viscosity	-.167	.022	-.117
Setback	-.363	-.666 (**)	.423

หมายเหตุ (*) มีความสัมพันธ์ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

(**) มีความสัมพันธ์ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงเคมีฟิสิกส์ของสตาร์ชข้าวเจ้า AM สูงกับสมบัติทางกลของสตาร์ชฟิล์ม จากตารางที่ 11 พบว่าค่าอุณหภูมิการเกิดเจลที่ในเซชัน และเอนทาลปีของสตาร์ชข้าว แสดงความสัมพันธ์ในเชิงลบกับร้อยละการยืดตัวของฟิล์ม ($r = -0.79$ และ $r = -0.80$ ตามลำดับ, $p < 0.01$) นอกจากนี้ยังมีการพบความสัมพันธ์ระหว่างค่า trough, breakdown และ setback กับความสามารถในการยืดตัวของสตาร์ชฟิล์ม ($r = 0.57$, $p < 0.05$, $r = -0.77$ และ -0.67 ตามลำดับ, $p < 0.01$) หรือกล่าวได้ว่าฟิล์มที่มีความสามารถในการยืดตัวได้ดีนั้น ควรมีค่า trough สูง และ ค่า breakdown และ setback ต่ำ แต่ข้อสรุปนี้ควรอยู่ในช่วงข้อกำหนดว่าความหนืดในช่วง breakdown และ setback ควรมีค่าอยู่ในช่วง 221 – 255 RVU และ 101 – 136 RVU ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการผลิตสตาร์ชฟิล์มที่มีการยืดตัวได้ดี สามารถคัดเลือกข้าวเจ้าไทย AM สูง ที่มีค่าอุณหภูมิการเกิดเจลที่ในเซชัน และเอนทาลปีต่ำ และควรมีค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชดัง ภาพที่ 6 นอกจากนี้จำนวนกลุ่มสายโซ่สั้น (DP 6-9 และ DP 6-12) ที่เพิ่มขึ้น ไม่เพียงแต่จะมีผลควบคุมให้

อุณหภูมิการเกิดเจลในเซชันของสตาร์ชลดลง ยังส่งผลให้สตาร์ชฟิล์มมีความแข็งแรงลดลง แต่เพิ่มความสามารถในการยืดตัว



ภาพที่ 6 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชที่เหมาะสมสำหรับผลิตฟิล์มยืดตัวได้ดี

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างละเอียด, สมบัติทางเคมี และ สมบัติทางเคมีฟิสิกส์ ของสตาร์ชข้าวไทยแอมิโลสสูงอย่างน้อย 7 สายพันธุ์, วิเคราะห์สมบัติทางกลของสตาร์ชฟิล์ม และ หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดังกล่าว พบว่า

1. สามารถแบ่งสตาร์ชออกเป็น 3 กลุ่ม คือ Tp ต่ำ, กลาง และสูง มีลักษณะการเปลี่ยนแปลง ความหนืด และค่าการพองตัวที่ 120 องศาเซลเซียสที่แตกต่างกัน สำหรับโครงสร้างละเอียด มวล โมเลกุลของสตาร์ช มีค่า อยู่ในช่วง $3.80 \times 10^5 - 8.54 \times 10^5$ คาลตันเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี Park Johnson และมีค่า $3.07 \times 10^6 - 3.68 \times 10^6$ คาลตันเมื่อคำนวณจากสมการ สำหรับมวลโมเลกุลของ AM และ AP มีค่า $9.06 \times 10^4 - 1.68 \times 10^5$ คาลตัน และ $4.34 \times 10^6 - 5.18 \times 10^6$ คาลตัน ตามลำดับ เมื่อคำนวณเทียบกับพอลิกลูแลนมาตรฐาน ลักษณะความเป็นกึ่งก้านของสตาร์ชมีความแตกต่างโดยค่า ร้อยละของบิตาแอมิโลไลซิสอยู่ในช่วงร้อยละ 58.70 – 69.20 CLn เท่ากับ 22.99 – 25.44 หน่วย กลูโคส $\overline{ECL}$ เท่ากับ 16.1 – 18.9 หน่วยกลูโคส และ $\overline{ICL}$ เท่ากับ 4.5 – 6.9 หน่วยกลูโคส การ กระจายตัวของสายโซ่สตาร์ชข้าวทั้ง 7 พันธุ์ มีทั้งแบบ bimodal, trimodal และ quartermodal distribution

2. ฟิล์มที่เตรียมจากสตาร์ช 3 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 50 โดย น้ำหนักสตาร์ชมีความแตกต่างกันในค่าของความต้านทานแรงดึง, ร้อยละการยืดตัว และค่าโมดูลัส ของยัง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.4 – 2.9 เมกะพาสกาล, ร้อยละ 35-55 และ 20 – 70 เมกะพาสกาล ตามลำดับ

3. เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างละเอียดและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ช ข้าว และสมบัติทางกลของสตาร์ชฟิล์ม

3.1 พบความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างสตาร์ชข้าว AM สูง และสมบัติเชิงความร้อน ของสตาร์ชข้าว มีความสัมพันธ์ระหว่าง สายโซ่สั้น (DP 6 -12) ของสตาร์ช กับ T_o , T_p , T_c , ΔH ใน เชิงลบ ($r = -0.8, -0.8, -0.8$, และ -0.7 , $p < 0.05$) และเชิงบวก ($r = 0.7$, $p < 0.05$) กับ $T_c - T_o$ ของ

สตาร์ช และสายโซ่ยาว $\overline{DP_n}$ (37 - 53) กับ T_o , T_p , T_c , ΔH จะเป็นไปได้ในทิศทางตรงกันข้ามกับสายโซ่สั้น ($r = 0.6$ และ 0.7 , $p < 0.05$ ตามลำดับ)

3.2 พบความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างละเอียดกับสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชกลุ่มสายโซ่สั้นมีความสัมพันธ์เชิงลบกับค่า breakdown และค่า setback (-0.7 , $p < 0.01$ และ -0.5 , $p < 0.05$ ตามลำดับ)

3.3 พบความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างละเอียดกับสมบัติทางกลของสตาร์ชฟิล์ม สายโซ่สั้น DP 6 – 9 มีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับร้อยละการยืดตัวและลบกับความต้านทานแรงดึงของฟิล์ม และค่าโมดูลัสของยัง ($r = 0.6$, -0.5 และ -0.6 ตามลำดับ, $p < 0.01$)

3.4 พบความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงเคมีฟิสิกส์ของสตาร์ชกับสมบัติทางกลของสตาร์ชฟิล์มโดย T_o , T_p , T_c และ ΔH แสดงความสัมพันธ์ในเชิงลบกับร้อยละการยืดตัวของฟิล์ม ($r = -0.79$ และ $r = -0.80$ ตามลำดับ, $p < 0.01$) นอกจากนี้พบความสัมพันธ์ระหว่างค่า trough, breakdown และ setback กับความสามารถในการยืดตัวของสตาร์ชฟิล์ม ($r = 0.57$, $p < 0.05$, $r = -0.77$ และ $r = -0.67$ ตามลำดับ, $p < 0.01$)

ข้อเสนอแนะ

1. ควรแยกแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน จากสตาร์ช และนำไปทำแห้งแบบ freeze dried เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างละเอียด (ความยาวสายโซ่ภายใน, ความยาวสายโซ่ภายนอก และการกระจายตัวของสายโซ่ เป็นต้น) เพื่อให้ได้ข้อมูลและนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่แน่นอน
2. ใช้กล้องสแกนและส่องด้วยกล้องชนิด คอนโฟคัล (confocal laser scanning microscope) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะองค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชที่อยู่ในรูปแบบฟิล์ม
3. ควรเตรียมสารละลายฟิล์มในเครื่องที่มีระบบคังต่อไปนี้เป็นระบบปิด, มีใบพัดกวน, ให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง และสามารถลดความดัน เพื่อให้เกรนูลของสตาร์ชถูกทำลายอย่างสมบูรณ์
4. ควรเก็บฟิล์มนานกว่า 2 เดือนและทดสอบสมบัติทางกลของสตาร์ชฟิล์มเพื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มปกติกับฟิล์มที่มีอายุการเก็บรักษามากขึ้น
5. วิเคราะห์ความเป็นผลึกของฟิล์มสตาร์ชด้วยเครื่อง X-ray diffraction

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- งามชื่น คงเสรี. 2545. มาตรฐานข้าว, น. 31-45. ใน งามชื่น คงเสรี, กิตติยา กิจควรดี, ละม้ายมาศ ยังสุข, สุนันทา วงศ์ปัทม และ อนุวัฒน์ รัตนชัย, ผู้รวบรวม. **คุณภาพข้าวและการตรวจสอบข้าวปนในข้าวหอมมะลิไทย**. บริษัทจิรวัดน์เอ็กซ์เพรส จำกัด, กรุงเทพฯ.
- ปาริฉัตร หงสประภาส. 2545. คุณสมบัติเชิงหน้าที่ของคาร์โบไฮเดรตในผลิตภัณฑ์อาหาร. **อาหาร** 32: 165-173.
- มณฑาทิพย์ ชุ่นฉลาด. 2535. फिल्मและสารเคลือบที่รับประทานได้. **อาหาร** 22: 1-6.
- วริพร โพธิ์จีน. 2550. ภาวะเศรษฐกิจการเกษตรประจำเดือน มกราคม 2550 (พืชอาหาร ข้าว). **วารสารเศรษฐกิจการเกษตร** 53 (593): 20-23.
- อรรณพ วงศ์ศิริโรจน์. 2537. ขนมห้าจากข้าว, น. 81-93. ใน **ศักยภาพข้าวไทย...ทิศทางใหม่สู่อุตสาหกรรม การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 32 สาขาอุตสาหกรรมเกษตร**. คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. 2547. **ข้าว : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- Aboubacar, A., K. Moldenhauer, A.M. McClung, D.H. Beighley and B.R. Hamaker. 2006. Effect of growth location in the United States on amylose content, amylopectin fine structure, and thermal properties of starches of long grain rice cultivars. **Cereal Chem.** 83 (1): 93-98.
- Allahgholipour, M., A.J. Ali, F. Alinia, T. Nagamine and Y. Kojima. 2006. Relationship between rice grain amylose and pasting properties for breeding better quality rice varieties. **Plant Breeding** 125: 357-362.

- AACC. 2000a. **Approved methods of the AACC** 10thed. AACC Method 08-01. American Association of Cereal Chemists. St. Paul, MN.
- AACC. 2000b. **Approved methods of the AACC** 10thed. AACC Method 44-15A. American Association of Cereal Chemists. St. Paul, MN.
- ASTM. 2000. **Standard Test Methods for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting**. ASTM D882-00. Annual Book of ASTM Standard. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- AOAC. 1995. **Official methods of analysis**. 16th ed. Association of Official Analytical Chemists Arlington, Virginia.
- Banker, G.S. 1966. Film coating theory and practice. **J. Pharmaceutical Sci.** 55 (1): 81-89.
- Bao, J. and C.J. Bergman. 2004. The functionality of rice starch, pp. 258-294. *In* A.C. Eliasson, ed. **Starch in food**. CRC Press LLC, USA.
- Bruice, P.Y. 2004. **Organic Chemistry**. (powerpoint presentation). Case Western Reserve University, Cleveland, OH.
- Bulter, B.L., P.J. Vergano, R.F. Testin, J.M. Bunn and J.L. Wiles. 1996. Mechanical and barrier properties of edible chitosan films as affected by composition and storage. **J. Food Sci.** 61 (5): 953-955.
- Cameron, D. and Y.J. Wang. 2005. A better understanding of factors that affect the hardness and stickiness of long-grain rice. **Cereal Chem.** 82 (2): 113-119.
- Champagne, E.T. 1996. Rice starch: composition and characteristics. **Cereal Food World** 41 (1): 833-838.

- Chaplin, M. 2006. **Starch**. Water structure and behavior. Available Source: www.lsbu.ac.uk/water/images/granul.gif, November 27, 2006.
- Chen, M.H. and C.J. Bergman. 2007. Method for determining the amylose content, molecular weights, and weight- and molar-based distributions of degree of polymerization of amylose and fine-structure of amylopectin. **Carbohydrate Polym.** In Press, Corrected Proof.
- Chrastil, J. 1987. Improved colorimetric determination of amylose in starches or flours. **Carbohydrate Res.** 159: 154-158.
- Chung, O.K. and J. Ohm. 2000. cereal lipids, pp. 417-477. In K. Kulp, ed. **Handbook of Cereal Science and Technology**. Marcel Dekkar, New York.
- Cooke, D. and M.J. Gidley. 1992. Loss of crystalline and molecular order during starch gelatinisation: origin of the enthalpic transition. **Carbohydrate Res.** 227: 103-112.
- Dubois, M., K.A. Gilles, J.K. Hamilton, P.A. Rebers and F. Smith. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Anal. Chem.** 28 (3): 350-356.
- Fan, J. and B.P. Marks. 1998. Retrogradation kinetics of rice flours as influenced by cultivar. **Cereal Chem.** 75: 153-155.
- Fishman, M.L., L. Rodriguez and H.K. Chau. 1996. Molar masses and sizes of starches by high-performance size-exclusion chromatography with on-line multi-angle laser light scattering detection. **J. Agric. Food Chem.** 44 (10): 3182-3188.
- Fitzgerald, M. 2004. Starch, pp. 109-141. In E.T. Champagne, ed. **Rice : chemistry and technology**. American Association of Cereal Chemists, Minnesota.

- Forssell, P., R. Lahtinen, M. Lahelin and P. Myllärinen. 2002. Oxygen permeability of amylose and amylopectin films. **Carbohydrate Polym.** 47 (2): 125-129.
- Gennadios, A. and C. Weller. 1990. Edible film and coating from wheat and corn protein. **Food Technol.** 44: 63-69.
- Gibson, T.S., V.A. Solah and B.V. McCleary. 1997. A Procedure to measure amylose in cereal starches and flours with concanavalin A. **J. Cereal Sci.** 25 (2): 111-119.
- Han, X.Z. and B.R. Hamaker. 2001. Amylopectin fine structure and rice starch paste breakdown. **J. Cereal Sci.** 34 (3): 279-284.
- Han, X.Z. and B.R. Hamaker. 2002. Location of starch granule-associated proteins revealed by confocal laser scanning microscopy. **J. Cereal Sci.** 35 (1): 109-116.
- Hanashiro, I., J. Abe and S. Hizukuri. 1996. A periodic distribution of the chain length of amylopectin as revealed by high-performance anion-exchange chromatography. **Carbohydrate Res.** 283: 151-159.
- Hanashiro, I. and Y. Takeda. 1998. Examination of number-average degree of polymerization and molar-based distribution of amylose by fluorescent labeling with 2-aminopyridine. **Carbohydrate Res.** 306: 421-426.
- Hanashiro, I., M. Tagawa, S. Shibahara, K. Iwata and Y. Takeda. 2002. Examination of molar-based distribution of A, B and C chains of amylopectin by fluorescent labeling with 2-aminopyridine. **Carbohydrate Res.** 337 (13): 1211-1215.
- Hizukuri, S. 1986. Polymodal distribution of the chain lengths of amylopectins, and its significance. **Carbohydrate Res.** 147 (2): 342-347.

Hizukuri, S., Y. Takeda, N. Maruta and B.O. Juliano. 1989. Molecular structures of rice starch. **Carbohydrate Res.** 189: 227-235.

Hizukuri, S. 1993. Towards an understanding of the fine structures of starch molecules. **Denpun Kagaku** 40: 133-147.

Iturriaga, L., B. Lopez and M. Anon. 2004. Thermal and physicochemical characterization of seven argentine rice flours and starches. **Food Res. Intl.** 37: 439-447.

Jane, J. and J. Chen. 1992. Effect of amylose molecular size and amylopectin branch chain length on paste properties of starch. **Cereal Chem.** 69: 60-65.

Jane, J., Y.Y. Chen, L.F. Lee, A.E. McPherson, K.S. Wong, M. Radosavljevic and T. Kasemsuwan. 1999. Effects of amylopectin branch chain length and amylose content on the gelatinization and pasting properties of starch. **Cereal Chem.** 76 (5): 629-637.

Juliano, B.O. 1985. Production and utilization of rice, pp. 1-16. *In* B.O. Juliano, ed. **Rice : chemistry and technology**. American Association of Cereal Chemists, Minnesota.

Juliano, B.O. 1998. Varietal impact on rice quality. **Cereal Food World** 43: 207-222

Kennedy, G. and B. Burlingame. 2003. Analysis of food composition data on rice from a plant genetic resources perspective. **Food Chem.** 80 (4): 589-596.

Krochta, J.M. and C.D. Mulder-Johnston. 1997. Edible and biodegradable polymer films: challenges and opportunities. **Food Technol.** 51: 61-74.

Laohakunjit, N. and A. Nookhorm. 2004. Effect of plasticizers on mechanical and barrier properties of rice starch film. **Starch** 56 (8): 348 - 356.

- Lii, C.Y., V.M.F. Lai, S. Lu and M.L. Tsai. 1998. Correlation between the physical property, eating quality and the molecular structure of rice-starchy systems. **Zywnosc Technologia Jakosc (Poland)** 4: 72-86.
- Lloyd, N.E. and L.C. Kirst. 1963. Some factors affecting the tensile strength of starch films. **Cereal Chem.** 40: 154-161.
- Lourdin, D., G. Della Valle and P. Colonna. 1995. Influence of amylose content on starch films and foams. **Carbohydrate Polym.** 27 (4): 261-270.
- Lu, S., C.Y. Chen and C.Y. Lii. 1997. Correlation between the fine structure, physicochemical properties, and the retrogradation of amylopectins from Taiwan rice varieties. **Cereal Chem.** 74: 34-39.
- Lumdubwong, N. and P.A. Seib. 2000. Rice starch isolation by alkaline protease digestion of wet-milled rice flour. **J. Cereal Sci.** 31: 63-74.
- Mark, A.M., W.B. Roth, C.L. Mehlretter and C.E. Rist. 1966. Oxygen permeability of amylomaize starch films. **Food Technol.** 20: 75-77.
- Mehyar, G.F. and J.H. Han. 2004. Physical and mechanical properties of high-amylose rice and pea starch films as affected by relative humidity and plasticizer. **J. Food Sci.** 69 (9): 449-454.
- Mizukami, H., Y. Takeda and S. Hizukuri. 1999. The structure of the hot-water soluble components in the starch granules of new Japanese rice cultivars. **Carbohydrate Polym.** 38 (4): 329-336.
- Morrison, W.R. 1995. Starch lipids and how they relate to starch granule structure and functionality. **Cereal Foods World** 40 (6): 437-446.

- Nakamura, Y., A. Sakurai, Y. Inaba, K. Kimura, N. Iwasawa and T. Nagamine. 2002. The fine structure of amylopectin in endosperm from Asian cultivated rice can be largely classified into two classes. **Starch** 54 (3-4): 117-131.
- Noda, T., Y. Nishiba, T. Sato and I. Suda. 2003. Properties of starches from several low-amylose rice cultivars. **Cereal Chem.** 80 (2): 193-197.
- Ong, M.H. and J.M.V. Blanshard. 1995. Texture determinants in cooked, parboiled rice. I: Rice starch amylose and the fine structure of amylopectin. **J. Cereal Sci.** 21 (3): 251-260.
- Park, I.M., A.M. Ibáñez and C.F. Shoemaker. 2007. Rice starch molecular size and its relationship with amylose content. **Starch** 59: 69-77.
- Patindol, J. and Y.J. Wang. 2002. Fine structures of starches from long-grain rice cultivars with different functionality. **Cereal Chem.** 79: 465-469.
- Petersson, M. and M. Stading. 2005. Water vapour permeability and mechanical properties of mixed starch-monoglyceride films and effect of film forming conditions. **Food Hydrocolloids** 19: 123-132.
- Qi, X., R.F. Tester, C.E. Snape and R. Ansell. 2003. Molecular basis of the gelatinisation and swelling characteristics of waxy rice starches grown in the same location during the same season. **J. Cereal Sci.** 37 (3): 363-376.
- Rankin, J., I. Wolff, H. Davis and C. Rist. 1958. Permeability of amylose film to moisture vapor, selected organic vapors, and the common gases. **Ind. Eng. Chem. Eng.** 3 (1): 120-123.
- Rindlav-Westling, A., M. Stading, A.M. Hermansson and P. Gatenholm. 1998. Structure, mechanical and barrier properties of amylose and amylopectin films. **Carbohydrate Polym.** 36 (2-3): 217-224.

- Rindlav-Westling, A. and P. Gatenholm. 2003. Surface composition and morphology of starch, amylose, and amylopectin films. **Biomacromolecules** 4 (1): 166-172.
- Shi, Y.C. and P.A. Seib. 1992. The structure of four waxy starches related to gelatinization and retrogradation. **Carbohydrate Res.** 227: 131-145.
- Singh, N., L. Kaur, K.S. Sandhu, J. Kaur and K. Nishinari. 2006. Relationships between physicochemical, morphological, thermal, rheological properties of rice starches. **Food Hydrocolloids** 20 (4): 532-542.
- Sodhi, N.S. and N. Singh. 2003. Morphological, thermal and rheological properties of starches separated from rice cultivars grown in India. **Food Chem.** 80 (1): 99-108.
- Srichuwong, S., T. Sunarti, T. Mishima, N. Isono and M. Hisamatsu. 2005. Starches from different botanical sources I: Contribution of amylopectin fine structure to thermal properties and enzyme digestibility. **Carbohydrate Polym.** 60: 529-538.
- Suzuki, Y., Y. Sano, T. Ishikawa, T. Sasaki, U. Matsukura and H. Hirano. 2003. Starch characteristics of the rice mutant du2-2 Taichung 65 highly affected by environmental temperatures during seed development. **Cereal Chem.** 80 (2): 184-187.
- Takeda, Y., S. Hizukuri and B.O. Juliano. 1986. Purification and structure of amylose from rice starch. **Carbohydrate Res.** 148 (2): 299-308.
- Takeda, Y., S. Shibahara and I. Hanashiro. 2003. Examination of the structure of amylopectin molecules by fluorescent labeling. **Carbohydrate Res.** 338 (5): 471-475.
- Tester, R.F., J. Karkalas and X. Qi. 2004. Starch-composition, fine structure and architecture. **J. Cereal Sci.** 39: 151-165.

- Vandeputte, G.E., R. Vermeulen, J. Geeroms and J.A. Delcour. 2003a. Rice starches. I. Structural aspects provide insight into crystallinity characteristics and gelatinisation behaviour of granular starch. **J. Cereal Sci.** 38 (1): 43-52.
- Vandeputte, G.E., V. Derycke, J. Geeroms and J.A. Delcour. 2003b. Rice starches. II. Structural aspects provide insight into swelling and pasting properties. **J. Cereal Sci.** 38 (1): 53-59.
- Vandeputte, G.E., R. Vermeulen, J. Geeroms and J.A. Delcour. 2003c. Rice starches. III. Structural aspects provide insight in amylopectin retrogradation properties and gel texture. **J. Cereal Sci.** 38 (1): 61-68.
- Vandeputte, G.E. and J.A. Delcour. 2004. From sucrose to starch granule to starch physical behaviour: a focus on rice starch. **Carbohydrate Polym.** 58 (3): 245-266.
- Van Soest, J. and J. Vliegenthart. 1997. Crystallinity in starch plastics: consequences for material properties. **Trends Biotechnol.** 15 (6): 208-213.
- Villareal, C.P., B.O. Juliano and S. Hizukuri. 1993. Varietal differences in amylopectin staling of cooked waxy milled rices. **Cereal Chem.** 70: 753-758.
- Walter, R.H. 1998. **Polysaccharide association structures in food.** Marcel Dekker Inc, New York.
- Wang, Y.J. and L.F. Wang. 2002. Structures of four waxy rice starches in relation to thermal, pasting and textural properties. **Cereal Chem.** 79: 252-256.
- Windholz, M., S. Budvari, L.Y. Stroumstos and M.N. Fertig. 1976. **The Merck Index.** 9th ed, Merck & Co., Inc., New Jersey.

- Wolff, I.A., H.A. Davis, J.E. Cluskey, L.J. Gundrum and C.E. Rist. 1951. Preparation of films from amylose. **Ind. Eng. Chem.** 43 (4): 915-919.
- Wong, K.S. and J. Jane. 1997. Quantitative analysis of debranched amylopectin by HPAEC-PAD with post-column enzyme reacto. **J. Liq Chrom.** 20 (2): 297-310.
- Wong, K.S., A. Kubo, J.L. Jane, K. Harada, H. Satoh and Y. Nakamura. 2003. Structures and properties of amylopectin and phytoglycogen in the endosperm of *sugary-1* mutants of rice. **J. Cereal Sci.** 37 (2): 139-149.
- Yamamoto, K., S. Surnie and O. Toshio. 1973. Properties of rice starch prepared by alkali method with various conditions. **Denpun Kagaku.** 20: 99-102.
- Yoo, S. and J. Jane. 2002. Molecular weights and gyration radii of amylopectins determined by high-performance size-exclusion chromatography equipped with multi-angle laser-light scattering and refractive index detectors. **Carbohydrate Polym.** 49 (3): 307-314.
- Yun, S.H. and N.K. Matheson. 1990. Estimation of amylose content of starches after precipitation of amylopectin by concanavalin A. **Starch** 42 : 302-305.
- Zhou, Z., K. Robards, S. Helliwell and C. Blanchard. 2002. Composition and functional properties of rice. **Int. J. Food Sci. Tech.** 37: 849-868.
- Zhu, Q. and E. Bertoft, 1997. Enzymic analysis of the structure of oxidized potato starches. **Int. J. Bio. Macromolecules.** 21 (1-2): 131-135.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
วิธีวิเคราะห์

การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน

1.1 เครื่องมือ

- 1.1.1 เครื่องย่อย (2006 digester exhaust system)
- 1.1.2 เครื่องกลั่นไนโตรเจน (Soxtec system HT2 1045 extraction unit)
- 1.1.3 ขวดแก้วเซดาห์ล์ (Kjeldahl flask)
- 1.1.4 บิวเรต
- 1.1.5 ตู้ระบายควัน

1.2 สารเคมี

- 1.2.1 กรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่มีความถ่วงที่มีความถ่วงจำเพาะ 1.84
- 1.2.2 สารละลายกรดบอริก ร้อยละ 4 ของน้ำหนัก
- 1.2.3 สารละลายมาตรฐานไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล
- 1.2.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 40 ของน้ำหนัก
- 1.2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยา ประกอบด้วย 3.5 กรัม โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2PO_4) + 0.4 กรัม คอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$)

1.3 วิธีวิเคราะห์

ชั่งตัวอย่างประมาณ 0.5 กรัม ใส่ลงในขวดแก้ว ระวังอย่าให้ติดข้างขวด ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา 1 ช้อน เติมกรดซัลฟิวริก 15 มิลลิลิตรแล้วเขย่าเบาๆวางบนขวดเครื่องย่อยในตู้ดูดควัน ต้มที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส นานประมาณ 30 นาที จนกระทั่งได้สารละลายใส ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น นำไปเข้าเครื่องนี้ต่อท่อให้ปลายจุ่มในฟลาสก์ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่บรรจุกรดบอริก 4 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 25 มิลลิลิตร เพื่อเก็บของแอมโมเนีย กลั่นประมาณ 5 นาที แล้วนำไปไตเตรตด้วยสารละลายมาตรฐานไฮโดรคลอริก 0.1 นอร์มัล จนกระทั่งเปลี่ยนเป็นสีชมพู แล้วนำไปคำนวณหา ร้อยละไนโตรเจน

1.4 วิธีคำนวณ

$$\frac{\text{ปริมาณโปรตีน}}{\text{ร้อยละของน้ำหนักแห้ง}} = \frac{(S - B) \times N \times 1.401 \times 5.27 \times 100}{W (100 - M)}$$

เมื่อ S = ปริมาตรไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไตเตรตสารตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรไฮโดรคลอริก ที่ใช้ในการไตเตรตเบลงค์ (Blank)

N = นอร์มัลลิตีของสารละลายมาตรฐานไฮโดรคลอริก

W = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

M = ร้อยละความชื้น

การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน

.1 เครื่องมือ

2.1.1 เครื่องวิเคราะห์ไขมัน (Soxtec system HT2; 1045 extraction unit และ 1046 service unit)

2.1.2 เครื่องทำความเย็น (CTL 911)

2.1.3 ถ้วยอะลูมิเนียม (extraction cups)

2.1.4 คีมสำหรับจับถ้วยอะลูมิเนียม

2.1.5 ทิมเบิล (thimble)

.2 สารเคมี

2.2.1 ปีโตรเลียมอีเทอร์

2.2.2 อะซิโตน

.3 วิธีวิเคราะห์

ชั่งตัวอย่างประมาณ 2.5 กรัม (W) บนกระดาษกรองและห่อให้มิดชิด จากนั้นนำมาใส่ลงในทิมเบิล นำทิมเบิลใส่ใน 1045 extraction units ซึ่งเชื่อมต่อกับ 1046 service units โดยใช้

adapter แล้วนำ extractor caps ไปอบและชั่งน้ำหนักที่แน่นอน (W_1) เติมตัวทำละลายประมาณ 45 มิลลิลิตร นำ extraction cups เข้าไปใน Soxtec system HT2 1045 extraction unit พร้อมทั้งเลื่อนคันโยกไปที่ตำแหน่ง boiling และสกดเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นเลื่อนคันโยกมาที่ตำแหน่ง rising ทำการ rising เป็นเวลา 45 นาที นำ extraction cups ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที ที่ extraction cups ให้เย็นในเคสติกเคเตอร์ ชั่งน้ำหนัก (W_2) แล้วคำนวณร้อยละไขมัน

.4 วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละไขมัน} = \frac{(W_2 - W_1) \times 100}{W}$$

เมื่อ W = น้ำหนักของตัวอย่าง เป็นกรัม

W_1 = น้ำหนักของ extraction cups เป็นกรัม

W_2 = น้ำหนักของ extraction cups และตัวอย่างหลังการอบให้แห้ง เป็นกรัม

การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า

นำตัวอย่างประมาณ 5 กรัม ประมาณ 5 กรัม ชั่งในจานกระเบื้องเคลือบ ที่เผาและชั่ง น้ำหนักที่แน่นอน นำไปเผาด้วยไฟอ่อนๆจนหมดควัน แล้วนำไปเผาในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 600 + 20 องศาเซลเซียส นานประมาณ 2-3 ชั่วโมง จนกระทั่งได้เถ้าสีขาวหรือสีเทา นำออกมาใส่ในเคสติกเคเตอร์ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วนำไปชั่ง เเผตัวอย่างซ้ำนานครั้งละ 30 นาที จนได้น้ำหนักต่างกันไม่เกิน 1 มิลลิกรัม ถือเป็นน้ำหนักของจานกระเบื้องเคลือบและตัวอย่างหลังจากเผาจนได้น้ำหนักคงที่

วิธีคำนวณ

$$\text{ปริมาณเถ้า (ร้อยละของน้ำหนัก)} = \frac{100 \times (W_2 - W_1)}{(W_1 - W)}$$

เมื่อ W = น้ำหนักของจานกระเบื้องเคลือบ เป็นกรัม

W_1 = น้ำหนักของจานกระเบื้องเคลือบ และตัวอย่างก่อนเผาเป็นกรัม

W_2 = น้ำหนักของจานกระเบื้องเคลือบ และตัวอย่างหลังจากเผาจนได้น้ำหนักคงที่เป็นกรัม

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น

.1 เครื่องมือ

4.1.1 ถ้วยอลูมิเนียม (aluminium dish) พร้อมด้วยฝาปิด

4.1.2 ตู้อบไฟฟ้าที่ปรับและควบคุมอุณหภูมิได้

4.1.3 เครื่องเคาะที่มีสารดูดความชื้น

.2 วิธีวิเคราะห์

ตามวิธีของ AACC Method 44-15A (AACC, 2000b) อบจานอะลูมิเนียมพร้อมด้วยฝาปิดในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส นานประมาณ 1 ชั่วโมง นำออกมาใส่ในเคสเคเตอร์ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักที่แน่นอน ชั่งตัวอย่างแบ่งในจานอะลูมิเนียมให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 5 กรัม อบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส นานประมาณ 1 ชั่วโมง นำออกมาใส่ในโถควบคุมความชื้น ทิ้งไว้ให้เย็นในอุณหภูมิห้อง แล้วนำไปชั่งอบซ้ำนานครั้งละ 30 นาที จนได้น้ำหนักต่างกันไม่เกิน 2 มิลลิกรัม จดน้ำหนักที่น้อยที่สุดถือเป็นน้ำหนักของจานอะลูมิเนียมและตัวอย่างหลังจากอบแห้งแล้ว

.3 วิธีคำนวณ

$$\text{ปริมาณความชื้น (ร้อยละของน้ำหนักร)} = \frac{100 \times (W_1 - W_2)}{W_1 - W}$$

เมื่อ W = น้ำหนักของจานอะลูมิเนียม เป็นกรัม

W_1 = น้ำหนักของจานอะลูมิเนียมและตัวอย่างและตัวอย่างก่อนอบ เป็นกรัม

W_2 = น้ำหนักของจานอะลูมิเนียมและตัวอย่างหลังอบแห้งเป็นกรัม

การวิเคราะห์หาปริมาณเส้นใย

5.1 เครื่องมือ

5.1.1 บีกเกอร์ (beaker) ชนิดไม่มีปากขนาด 600 มิลลิลิตร

5.1.2 เครื่องย่อย (digestion apparatus) ที่มีคอนเดนเซอร์ (condenser) สำหรับควบคุม ปริมาตรของสารละลายให้คงที่ตลอดเวลาการย่อย

5.1.3 กระจกกรองเบอร์ 1 และเบอร์ 42

5.1.4 ภาชนะชั่ง (Gooch crucible)

5.1.5 ตู้อบไฟฟ้าที่ปรับและควบคุมอุณหภูมิได้

5.1.6 เตาเผาไฟฟ้าที่ปรับและควบคุมอุณหภูมิได้

5.1.7 เครื่องเคาะที่มีสารดูดความชื้น

5.2 สารเคมี

5.2.1 กรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้น 0.255 นอร์มัล (สารละลาย 100 มิลลิลิตร มีกรด 1.25 กรัม)

5.2.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.313 นอร์มัล (สารละลาย 100 มิลลิลิตร มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.25 กรัม)

5.2.3 แอลกอฮอล์ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 95

5.3 วิธีวิเคราะห์

ตามวิธีของ AOAC (1995) ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนัก 2.5 กรัม (W) ใส่ในบีกเกอร์ ขนาด 600 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟูริก 0.255 นอร์มัล ซึ่งต้มเดือดลงไป 200 มิลลิลิตร นำไปเข้าเครื่องย่อย และต้มเดือดต่อไปอีกนาน 30 นาทีพอดี กรองทันทีด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 (ใช้ suction) ล้างด้วยน้ำร้อนจนหมดกรด (ประมาณ 200 มิลลิลิตร) ตรวจสอบด้วยกระดาษลิตมัส ถ่ายกากบนกระดาษกรองลงในบีกเกอร์เดิมจนหมด จากนั้นย่อยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.313 นอร์มัล ซึ่งต้มเดือดจำนวน 200 มิลลิลิตร นำไปเข้าเครื่องย่อยทันที และต้มให้เดือดต่อไปอีกนาน 30 นาทีพอดีเช่นเดียวกับครั้งแรก กรองทันทีผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42 ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน (ใช้ suction) ล้างด้วยน้ำร้อนจนหมดต่าง (ประมาณ 200 มิลลิลิตร) ตรวจสอบด้วยกระดาษลิตมัส

ล้างกากที่เหลือด้วยแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร นำกระดาษกรองใส่ครุชเบิลแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105-107 องศาเซลเซียส นานประมาณ 2 ชั่วโมง นำออกมาใส่ในเคชเคเตอร์ ทิ้งไว้ให้เย็นในอุณหภูมิห้องนำไปชั่ง อดตัวอย่างนี้ซ้ำ นานครั้งละ 30 นาที จนได้น้ำหนักต่างกันไม่เกิน 1 มิลลิกรัม จดน้ำหนักที่น้อยที่สุดถือเป็นน้ำหนักของครุชเบิลและกากหลังจากอบแห้งแล้ว (W_1) นำครุชเบิลพร้อมด้วยกากที่อบแห้ง ไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 ± 20 องศาเซลเซียส นานประมาณ 30 นาที (จนขาว) แล้วนำออกมาใส่ในเคชเคเตอร์ ทิ้งไว้ให้เย็นในอุณหภูมิห้อง นำไปชั่ง แล้วเผาซ้ำ นานครั้งละ 30 นาที จนได้น้ำหนักต่างกันไม่เกิน 1 มิลลิกรัม จดน้ำหนักที่น้อยที่สุดถือเป็นน้ำหนักของครุชเบิลและเถ้าหลังจากเผา (W_2) ผลแตกต่างระหว่างการชั่งน้ำหนักทั้งสองครั้งคือน้ำหนักของเส้นใย

5.4 วิธีคำนวณ

$$\text{ปริมาณเส้นใย (ร้อยละของน้ำหนัก)} = \frac{100 \times (W_1 - W_2)}{W}$$

เมื่อ W = น้ำหนักของตัวอย่าง เป็นกรัม

W_1 = น้ำหนักของครุชเบิลและกากหลังจากอบแห้งแล้ว เป็นกรัม

W_2 = น้ำหนักของครุชเบิลและเถ้าหลังจากเผาแล้วลบด้วยน้ำหนักกระดาษกรอง เป็นกรัม

การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสโดยวิธี Chrastil (1987)

.1 วิธีวิเคราะห์

.1.1 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

ชั่งน้ำหนักสตาร์ชหรือแป้ง ประมาณ 10-20 มิลลิกรัมในหลอด centrifuge สกัดด้วย 5 มิลลิลิตร เมทานอล (ร้อยละ 85) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 15 นาที centrifuge แล้วทิ้ง supernatant ไปแล้วทำการสกัดอีกครั้งหนึ่ง เติมน้ำ 2 มิลลิลิตร 0.4 โมลาร์ NaOH คนให้เข้ากันแล้วเติมน้ำกลั่น 4 มิลลิลิตร เขย่า ให้ความร้อนในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียส 30 นาที (Solution I) ปิเปตสารละลายในหลอด centrifuge 1 มิลลิลิตรผสมกับ TCA ร้อย

ละ 0.5 ปริมาณ 5 มิลลิลิตร ในหลอดทดลอง เติม 0.05 มิลลิลิตร 0.1 นอร์มัล I_2 -KI Solution วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร

1.2 การเตรียมกราฟมาตรฐาน

ชั่ง Potato amylose 50 มิลลิกรัม เติม 8.3 มิลลิลิตร 0.4 นอร์มัล NaOH เขย่าให้เข้ากันปรับปริมาตรให้เป็น 25 มิลลิลิตร (ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร) ให้ความร้อน 95 องศาเซลเซียส 30 นาที ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (ความเข้มข้นคิดเป็นร้อยละ 100) เตรียมเป็นระดับความเข้มข้นต่างๆ ที่ร้อยละ 20, 40, 60, 80, 100 (ปรับปริมาตรให้เป็น 6 มิลลิลิตร โดยใช้ 0.13 นอร์มัล NaOH) ปิเปต TCA ร้อยละ 0.5 ปริมาณ 5 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง เติม 1 มิลลิลิตรของสารแต่ละความเข้มข้นลงไป ในหลอดทดลอง เติม 0.05 มิลลิลิตร 0.1 นอร์มัล I_2 -KI Solution และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร

การวิเคราะห์ปริมาณอะมิโนส ด้วยวิธี Concanavalin-A (Con A)

1. วิธีวิเคราะห์

ชั่งตัวอย่างแบ่งจำนวน 20-25 มิลลิกรัม ใส่ในหลอด เติม DMSO (Dimethyl sulphoxide) ปริมาณ 1 มิลลิลิตร เขย่าเบา ๆ จากนั้นนำไปแช่ในน้ำเดือดเวลานาน 1 นาที เขย่าหลอดเพื่อให้ตัวอย่างกระจายตัวใน DMSO จนกระทั่งสังเกตเห็นว่าตัวอย่างเจลาติไนซ์จนหมด จึงแช่หลอดต่อนาน 15 นาที นำมาวางที่อุณหภูมิห้องนานประมาณ 50 นาทีและเติมเอทานอล ร้อยละ 95 ปริมาณ 2 มิลลิลิตร และเขย่าหลอดเพื่อผสมให้เข้ากัน แล้วจึงเติมเอทานอล ร้อยละ 95 อีกครั้งโดยเติมปริมาณ 4 มิลลิลิตรลงในตัวอย่าง ปิดฝาและผสมตัวอย่างภายในหลอดให้เข้ากันโดยกลับหลอดขึ้นลง และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 15 นาที นำหลอดมาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2,000xg เป็นเวลานาน 5 นาที เทส่วนใสทิ้งและใช้กระดาษทิชชูช่วยในการดูดซับแอกอสลออกจากตัวอย่างออกไป เติม DMSO อีกครั้งโดยใช้ปริมาณ 1 มิลลิลิตร เพื่อทำการเจลาติไนซ์ตัวอย่างอีกครั้ง ในขั้นตอนนี้จะแช่หลอดที่บรรจุตัวอย่างเป็นเวลาประมาณ 15 นาที เช่นเดียวกับขั้นแรกที่ทำเพื่อกำจัดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่าง นำหลอดออกจากอ่างน้ำเดือดและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เติม Con A solvent ปริมาณ 2 มิลลิลิตร จากนั้นจึงถ่ายตัวอย่างใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร โดยใช้ Con A solvent ในการถ่ายสารและปรับปริมาตรตัวอย่างที่ได้จากขั้นตอนนี้ เรียกว่า Solution I (การวิเคราะห์จะต้องทำภายใน 60 นาที)

.1.1 การตกตะกอนอะมิโลเพกตินด้วย Con A และนำมาวัดปริมาณอะมิโลส

ถ่าย Solution I ปริมาณ 1 มิลลิลิตรใส่ใน eppendorf ขนาด 2 มิลลิลิตร และเติม Con A solution ปริมาณ 0.5 มิลลิลิตร ปิดฝา eppendorf ผสมให้เข้ากัน โดยกลับ eppendorf ขึ้นลง และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 20,000xg เป็นเวลานาน 10 นาที ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส แล้วถ่ายส่วนใสใส่ในหลอดและเติมโซเดียมแอซิเตดบัฟเฟอร์เข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ปริมาณ 3 มิลลิลิตร ซึ่งมีพีเอชเท่ากับ 4.5 นำไปวางในอ่างน้ำเดือดนาน 5 นาที จากนั้นนำมาวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส นานประมาณ 5 นาที จึงเติม amyloglucosidase/amylase mixture ปริมาณ 0.1 มิลลิลิตร และบ่มต่อที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลานาน 30 นาที นำไปเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2,000xg เป็นเวลานาน 5 นาที จึงถ่ายส่วนใสปริมาณ 1 มิลลิลิตรใส่หลอด และเติม GOPOD reagent ปริมาณ 4 มิลลิลิตร และนำไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร สำหรับ reagent blank จะใช้โซเดียมแอซิเตดบัฟเฟอร์เข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ปริมาณ 1 มิลลิลิตรและเติม GOPOD reagent วิเคราะห์เช่นเดียวกับตัวอย่าง

.1.2 การวัดค่า total starch

ดูด Solution I ปริมาณ 0.5 มิลลิลิตรใส่หลอด และเติมโซเดียมแอซิเตดบัฟเฟอร์เข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ปริมาณ 4 มิลลิลิตร ซึ่งมีความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4.5 นำมาวางในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส นานประมาณ 5 นาที แล้วเติม amyloglucosidase/amylase mixture ปริมาณ 0.1 มิลลิลิตร และบ่มต่อที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที ถ่ายส่วนใสปริมาณ 1 มิลลิลิตรใส่หลอด และเติม GOPOD reagent ปริมาณ 4 มิลลิลิตร และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร สำหรับ reagent blank จะใช้โซเดียมแอซิเตดบัฟเฟอร์เข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ปริมาณ 1 มิลลิลิตร และเติม GOPOD reagent วิเคราะห์เช่นเดียวกับตัวอย่าง

.2 การคำนวณ

$$\% \text{ Amylose} = \frac{\text{Absorbance ของส่วนใสหลังตกตะกอนอะมิโลเพกตินด้วย Con A} \times 6.15 \times 100}{\text{Absorbance ของส่วนที่เป็น Total starch} \times 9.2}$$

การคำนวณกำลังการพองตัว และการละลาย (Vandeputte *et al.*, 2003b)

8.1 การคำนวณ

$$\text{สมบัติการพองตัว} = \frac{\text{น้ำหนักส่วนตกตะกอน}}{(\text{น้ำหนักแห้งสตาร์ช} - \text{น้ำหนักของฟิล์ม})}$$

$$\text{สมบัติการละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักฟิล์ม} \times 100}{\text{น้ำหนักแห้งสตาร์ช}}$$

การวิเคราะห์ความยาวสายโซ่เฉลี่ยโดยดัดแปลงวิธี Park-Johnson (Hizukuri, 1986)

.1 เครื่องมือ

- .1.1 ปีกเกอร์ขนาด 10 มิลลิลิตร
- .1.2 ปิเปตอัตโนมัติ
- .1.3 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง
- .1.4 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ
- .1.5 Hot plate
- .1.6 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง

.2 สารเคมี

- 7.2.1 สาร A : buffer 4.8 กรัม Na_2CO_3 + 9.2 กรัม NaHCO_3 + 0.65 กรัม KCN/L
- 7.2.2 สาร B : สารละลาย ferricyanide (0.5 กรัม $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ ต่อลิตร)
- 7.2.3 สาร C : สารละลาย ferric ammonium sulfate (3 กรัมต่อลิตร 50 มิลลิโมลาร์

H_2SO_4)

- 7.2.4 เอทานอล ร้อยละ 99
- 7.2.5 2 โมลาร์ NaOH
- 7.2.6 1 โมลาร์ HCl

.3 วิธีการวิเคราะห์

ชั่งตัวอย่างสาร 6.5 – 7.6 มิลลิกรัม (น้ำหนักแห้ง) ในปิเกตอร์ 10 มิลลิลิตร เติม เอทานอลร้อยละ 99 ปริมาณ 0.2 มิลลิลิตร เติมน้ำ 1 มิลลิลิตร และเติมด่าง 0.5 มิลลิลิตร 2 โมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เขย่าให้สารละลายเติมน้ำอีก 0.5 มิลลิลิตร ปรับความเป็นกรด่างให้อยู่ ในช่วง 6.5 – 7.0 ด้วย 1 โมลาร์ กรดไฮโดรคลอริก ปรับปริมาตรให้ได้ 5 มิลลิลิตร และ ปิเปต สารละลาย 2 มิลลิลิตรเพื่อปรับปริมาตรอีกครั้งให้ได้ 10 มิลลิลิตร แล้วแช่ไว้ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่ 50 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ปิเปตสารละลาย 1 มิลลิลิตร ผสมกับสาร A 0.5 มิลลิลิตร และ สาร B 0.5 มิลลิลิตร นำไปต้มในน้ำเดือดนาน 15 นาที ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และเติมสาร C 2.5 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ในตู้เย็น 20 นาที วัดค่าที่ความยาวคลื่น 715 นาโนเมตร

การคำนวณน้ำหนักโมเลกุลของแอมิโอสและแอมิโอฟอกทิน (Park *et al.*, 2007)

$$.1 \text{ การคำนวณ} = \frac{(\text{ร้อยละ AM} \times \overline{\text{Mn ของ AM}}) + (\text{ร้อยละ AP} \times \overline{\text{Mn ของ AM}})}{100}$$

การวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธีของ Nelsen

.1 สารเคมี

.1.1 Low alkaline copper reagent เตรียมดังต่อไปนี้

1. Rochell salt 12 กรัม + 24 กรัม anhydrous sodium carbonate ละลายในน้ำ กลั่นปริมาตร 250 มิลลิลิตร
2. Cupric sulfate pentahydrate 4 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร เติม 16 กรัม sodium hydrogen carbonate เติกลงไปในสารละลายตามข้อ 1
3. ละลาย 180 กรัม anhydrous sodium sulfate ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร ต้มให้ เดือด
4. นำสารละลายทั้งหมดมาผสมกัน ปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำ กลั่น (เก็บไว้ 1 สัปดาห์ก่อนนำมาใช้)

.1.2 Arsenomolybdate reagent

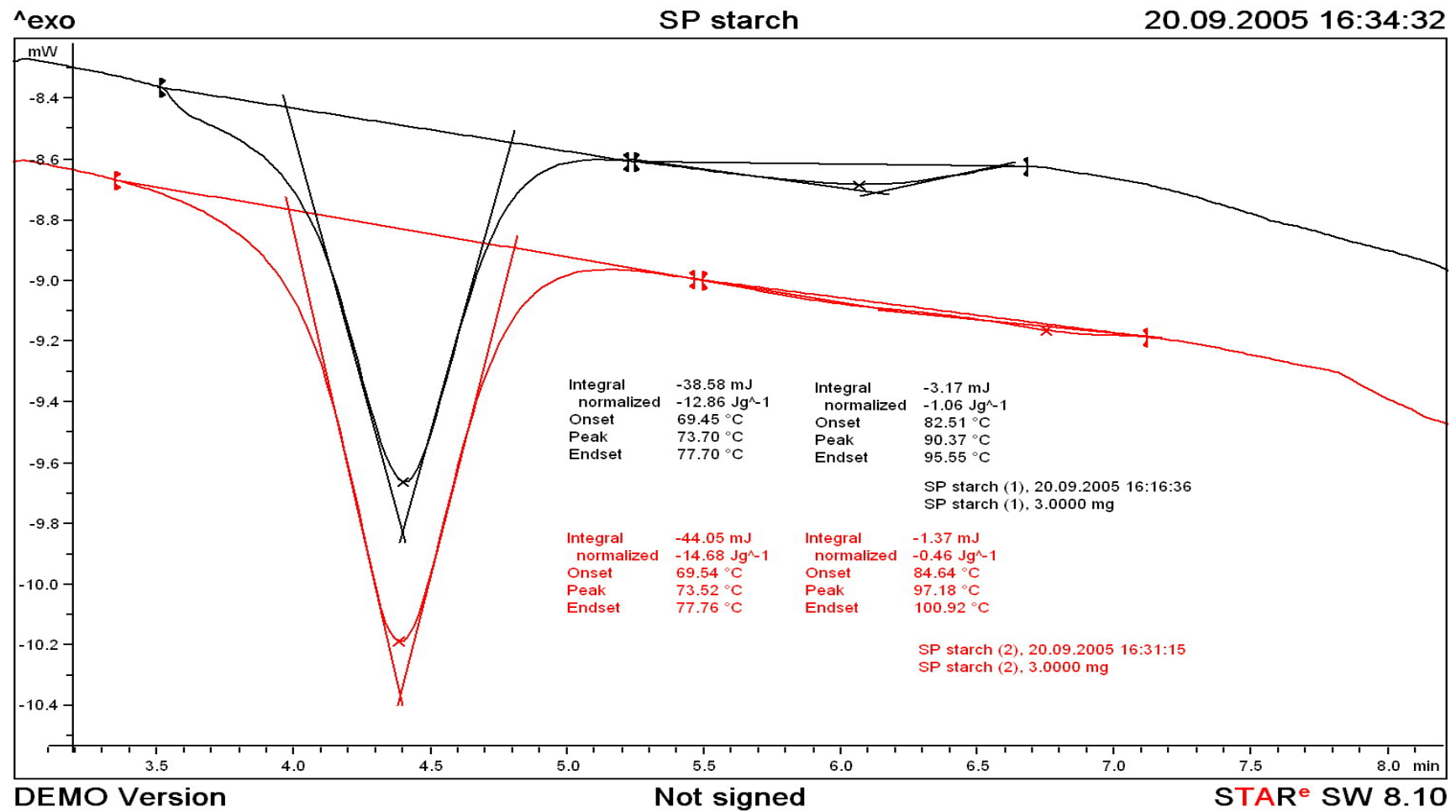
1. ละลาย 25 กรัม ammonium molybdate ในน้ำกลั่น 450 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟูริก ร้อยละ 96 ปริมาณ 21 มิลลิลิตร
2. ละลาย 3 กรัม disodium hydrogenate heptahydrate ในน้ำกลั่น 25 ml
3. ผสมสารละลายในข้อ 1 และ 2 ให้เข้ากันและเก็บไว้ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 37 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ก่อนใช้

.2 วิธีวิเคราะห์

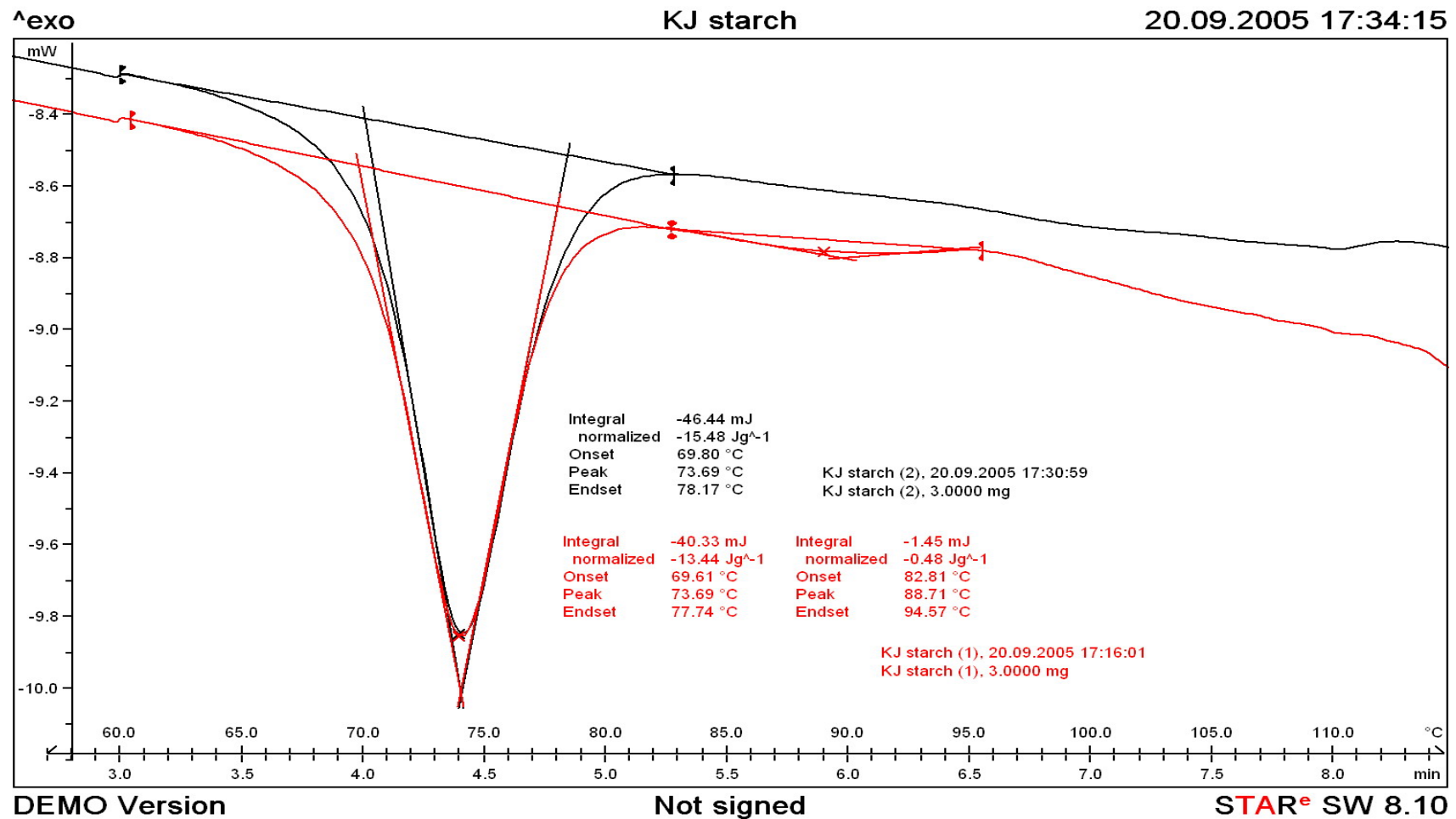
ปิเปต 1-5 มิลลิลิตรสารละลายตัวอย่างลงในหลอดทดลอง เติม low-alkalinity copper reagent ในปริมาตรที่เท่ากัน นำไปต้มในน้ำเดือด 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เติม arsenomolybdate reagent 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันจนเป็นสารละลายเนื้อเดียวกันหมด ปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 500 นาโนเมตร

ภาคผนวก ข

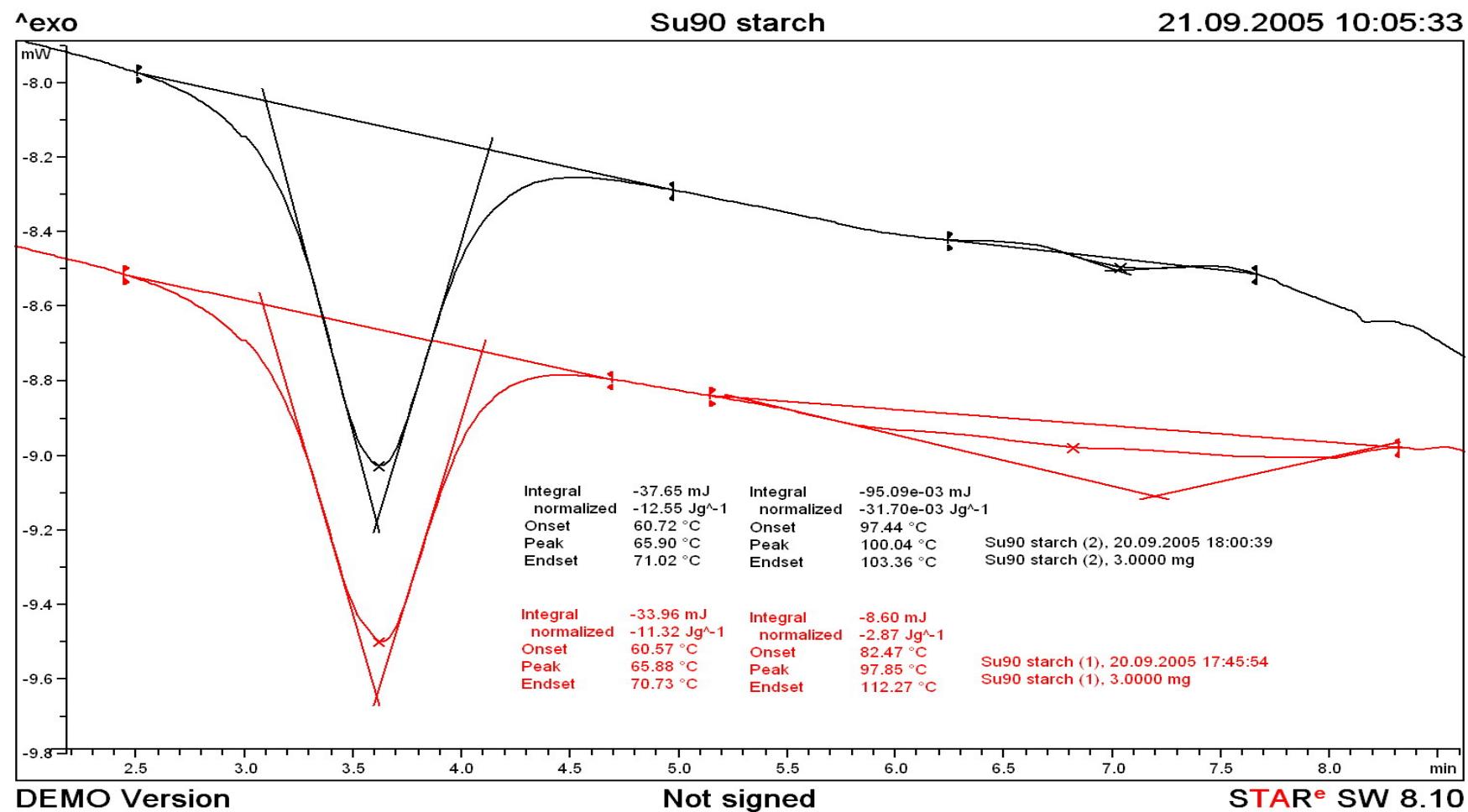
การวิเคราะห์อุณหภูมิการเกิดเจลลาทีโนเซชันด้วยเครื่อง differential scanning calorimeter



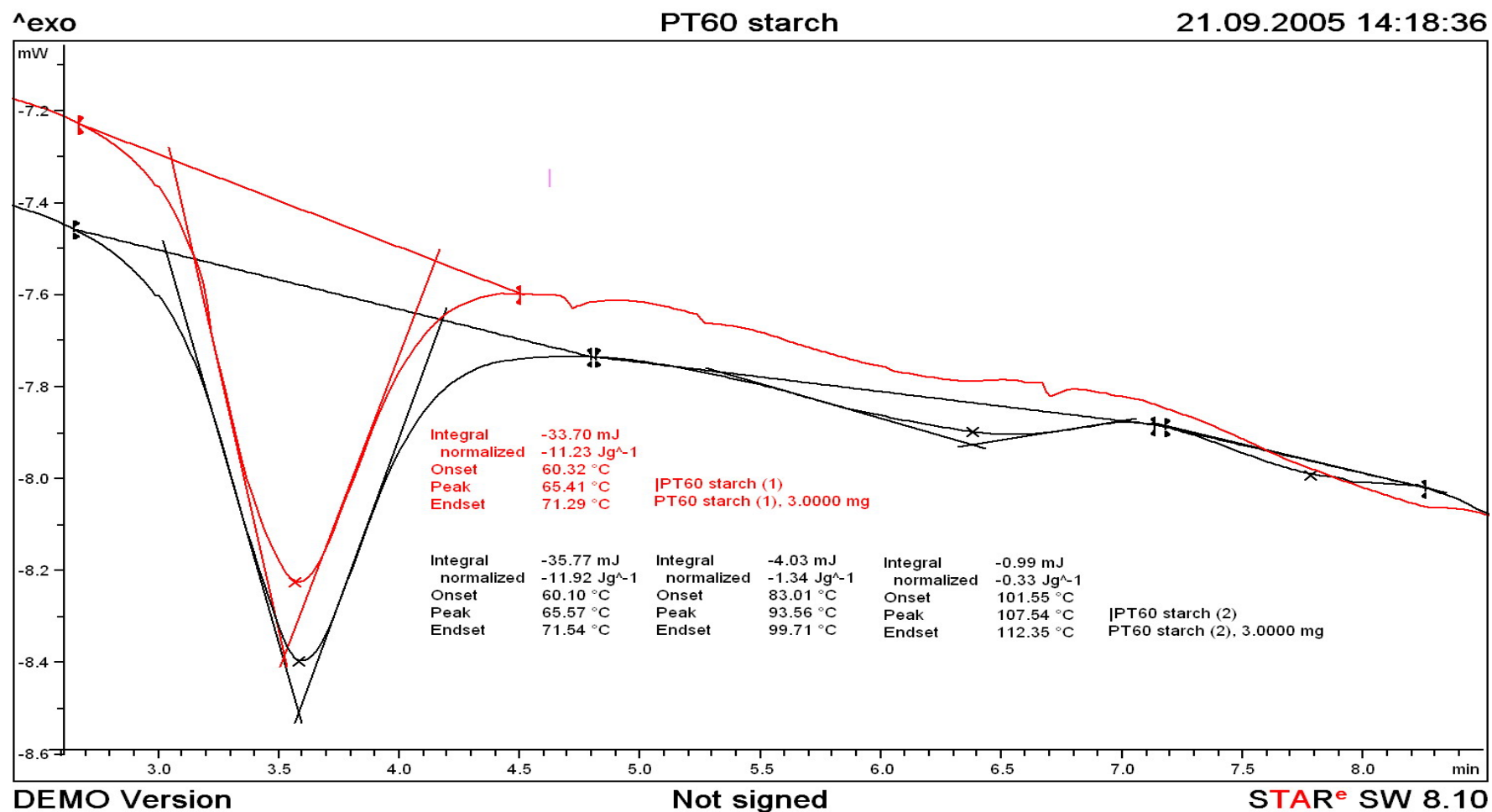
ภาพผนวกที่ ข1 การวัดค่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันและเอนทาลปีของสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์เงี้ยวพัทลุง



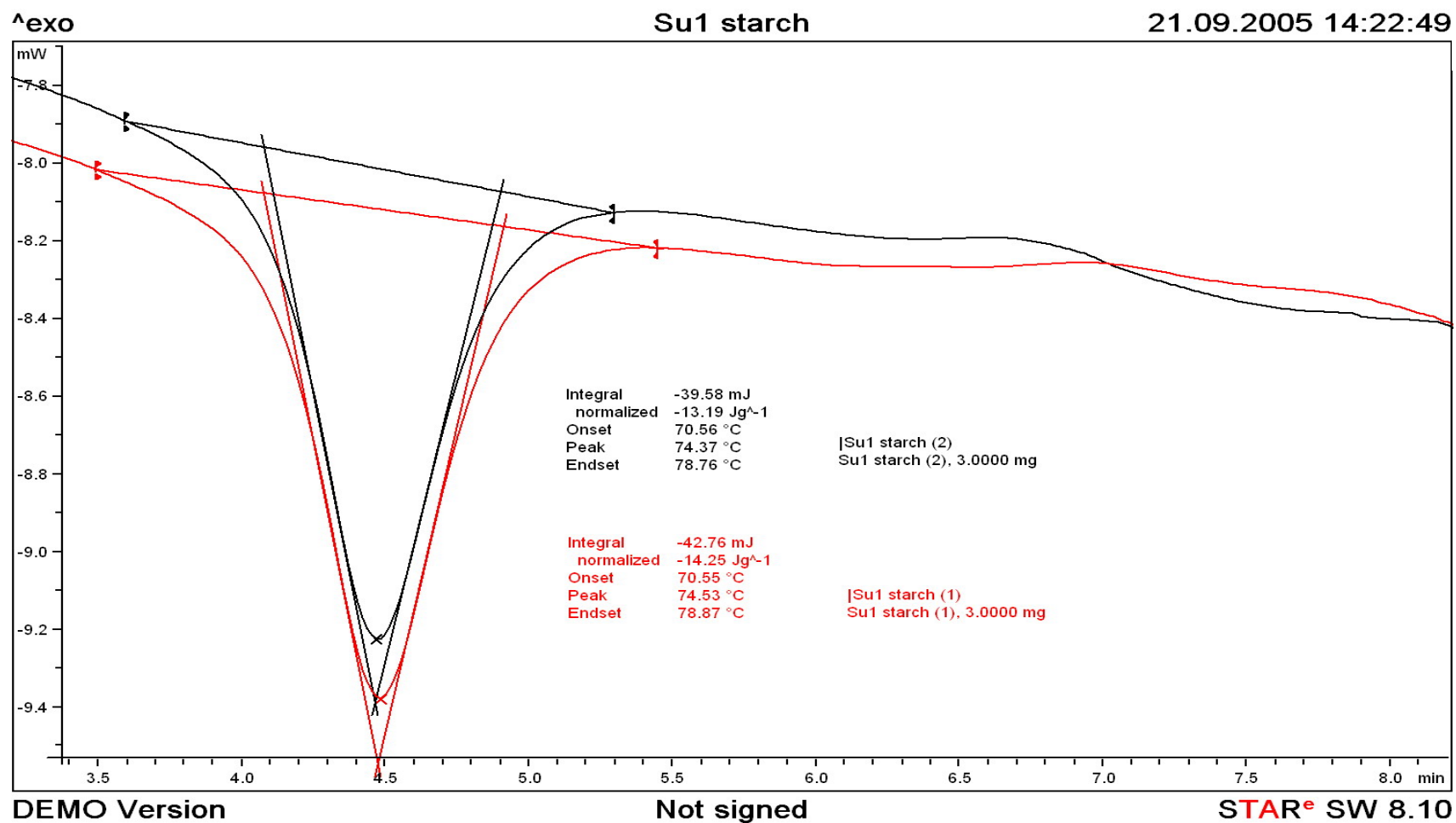
ภาพผนวกที่ ข2 การวัดค่าอุณหภูมิการเกิดเจลในเซชันและเอนทาลปีของสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์แก่นจันทร์



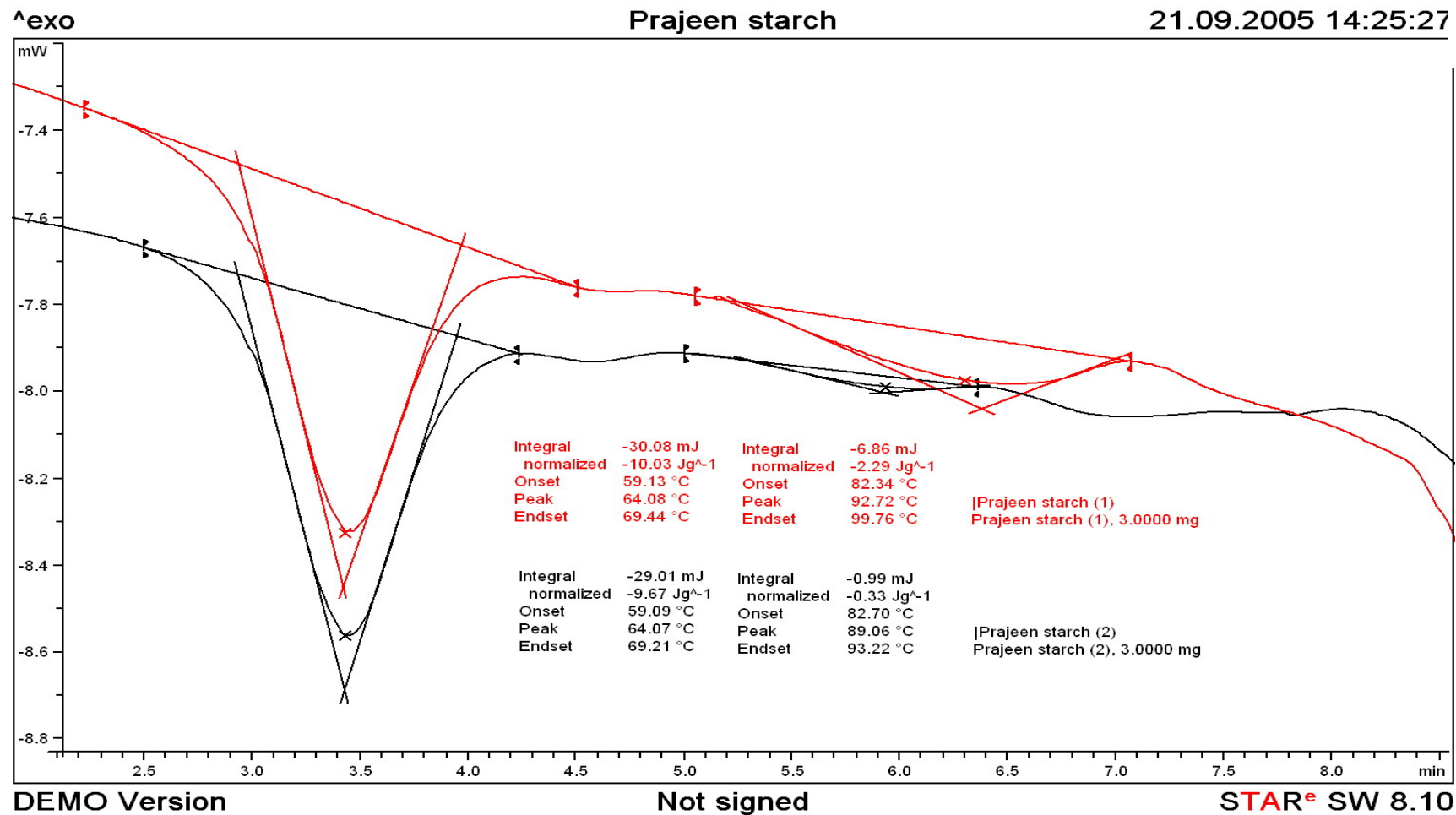
ภาพผนวกที่ ข3 การวัดค่าอุณหภูมิการเกิดเจลในเซชันและเอนทาลปีของสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90



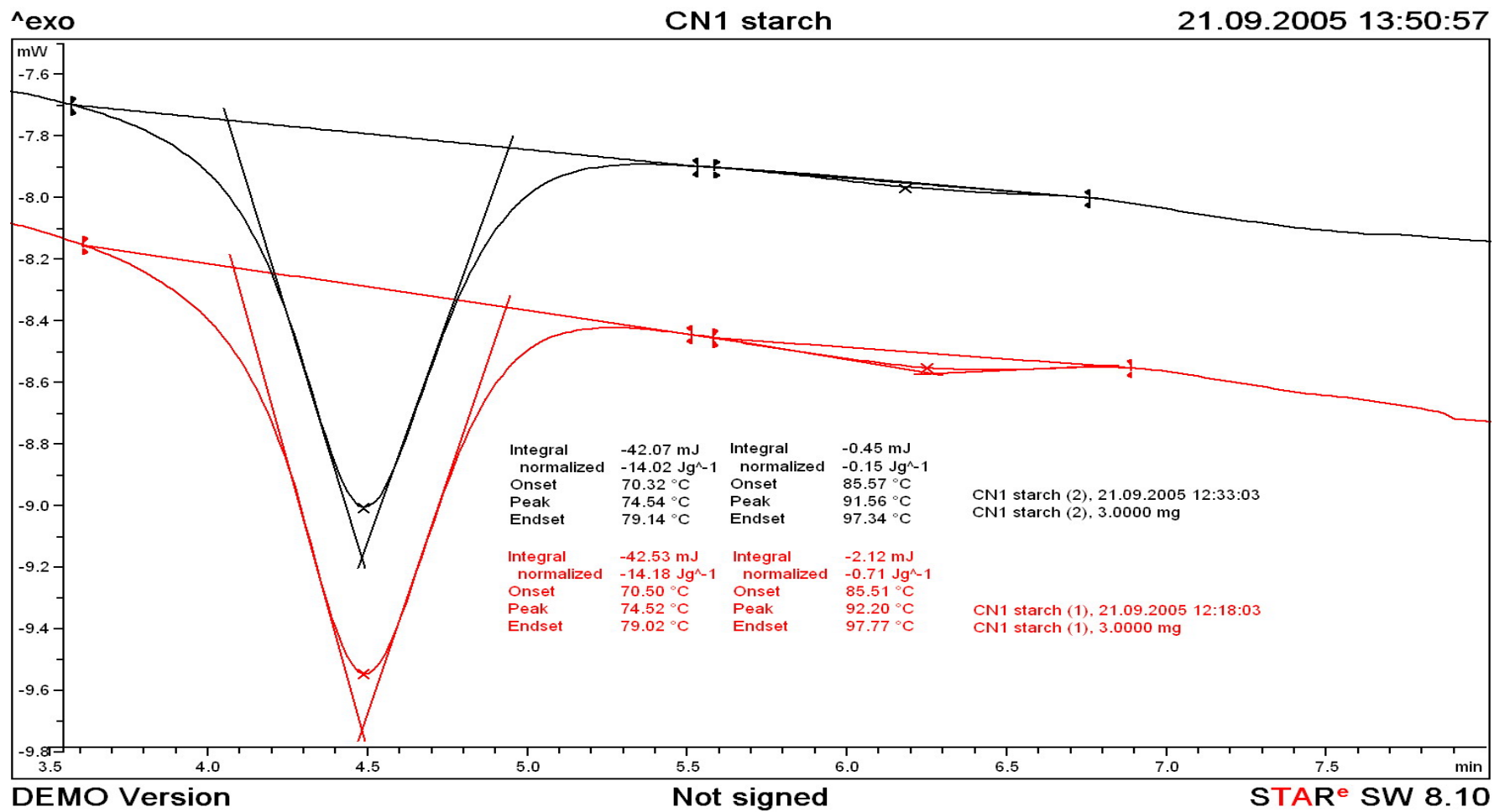
ภาพผนวกที่ ข4 การวัดค่าอุณหภูมิการเกิดเจลที่ในเซชันและเอนทาลปีของสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ปทุมธานี 60



ภาพผนวกที่ ข5 การวัดค่าอุณหภูมิการเกิดเจลในเซชันและเอนทาลปีของสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 1



ภาพผนวกที่ ข6 การวัดค่าอุณหภูมิการเกิดเจลลาทีในเซชันและเอนทาลปีของสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ปราจีนบุรี 1



ภาพผนวกที่ ข7 การวัดค่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิ่งในเซนชันและเอนทาลปีของสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาท 1

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายณพล พงษ์ไพโรจน์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 16 กันยายน 2525
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (วิทยาศาสตร์การอาหาร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-