บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์

การศึกษาครั้งนี้ใช้สตาร์ชมันสำปะหลังผสมกับสตาร์ชข้าวอะมิโลสสูงในสัดส่วนสตาร์ชมันสำปะหลัง (C): สตาร์ชข้าวอะมิโลสสูง (R) เท่ากับ 100:0 90:10 80:20 70:30 60:40 50:50 40:60 30:70 20:80 10:90 และ 0:100 ผลิตเป็นสตาร์ชผสมพรีเจลด้วยวิธีพรีเจลาติไนเซชัน
ผลการศึกษาสมบัติของสตาร์ชดิบและสตาร์ชผสมพรีเจลเป็นดังนี้

4.1 สมบัติของสตาร์ชผสม

4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชข้าวและมันสำปะหลัง

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี คือ ปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า ความชื้นและปริมาณอะมิโลสของสตาร์ชดิบ 2 ชนิด คือ สตาร์ชมันสำปะหลังและสตาร์ชข้าวอะมิโลสสูง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชมันสำปะหลังและสตาร์ชข้าวอะมิโลสสูง

องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง)	ชนิดสตาร์ช	
	มันสำปะหลัง	ข้าว
โปรตีน	0.27±0.00	1.33±0.00
ไขมัน	0.15±0.05	0.27±0.03
เถ้า	0.13±0.05	0.21±0.05
อะมิโลส	17.32±0.78	27.87±0.51
ความชื้น	10.94±0.67	10.53±0.78

ปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า และความชื้นของสตาร์ชมันสำปะหลังมีค่า 0.27 0.15 0.13 และ 10.94 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับขณะที่ของสตาร์ชข้าวมีค่า 1.33 0.27 0.21 และ10.53 ตามลำดับ Srisoth *et al.* (1999) ได้รายงานค่าองค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชมันสำปะหลังไว้ดังนี้ คือ โปรตีน 0.1 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 0.1 เปอร์เซ็นต์ เถ้า 0.2 เปอร์เซ็นต์ และความชื้น 13 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งปริมาณเถ้าและความชื้นจากการทดลองนี้อยู่ในช่วงเดียวกัน และ Charles *et al.* (2007) รายงานถึงองค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ได้จากมันสำปะหลังจากไร่ทางตอนใต้ของไต้หวันไว้ดังนี้คือปริมาณโปรตีน 0.09 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 0.15เปอร์เซ็นต์ เถ้า 0.02 เปอร์เซ็นต์ คืนจันทร์ (2552) ได้รายงานว่าสตาร์ชข้าวมีปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วง 0.24 ถึง 0.56 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนักเปียก) ไขมัน 0.46 ถึง 0.51 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนักเปียก) และเถ้า 0.17 ถึง 0.21 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนักเปียก) ซึ่งปริมาณเถ้าจากการทดลองนี้อยู่ในช่วงเดียวกัน

สำหรับปริมาณอะมิโลสพบว่าในสตาร์ชมันสำปะหลังและสตาร์ชข้าวอะมิโลสสูงมีปริมาณอะมิโลสอยู่ 17.32 และ 27.87 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ Singh *et al.* (2003) ได้รายงานว่าสตาร์ชข้าวมีปริมาณอะมิโลส 5-28.4 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว ส่วนสตาร์ชมันสำปะหลัง Tongdang *et al.* (2008)

พบว่ามีปริมาณอะมิโลส 17.7เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัวอย่างแห้ง ซึ่งปริมาณอะมิโลสในสตาร์ชมันสำปะหลังและสตาร์ข้าวอะมิโลสสูง จากการทดลองนี้ได้ผลที่อยู่ในช่วงเดียวกันกับรายงานข้างต้น

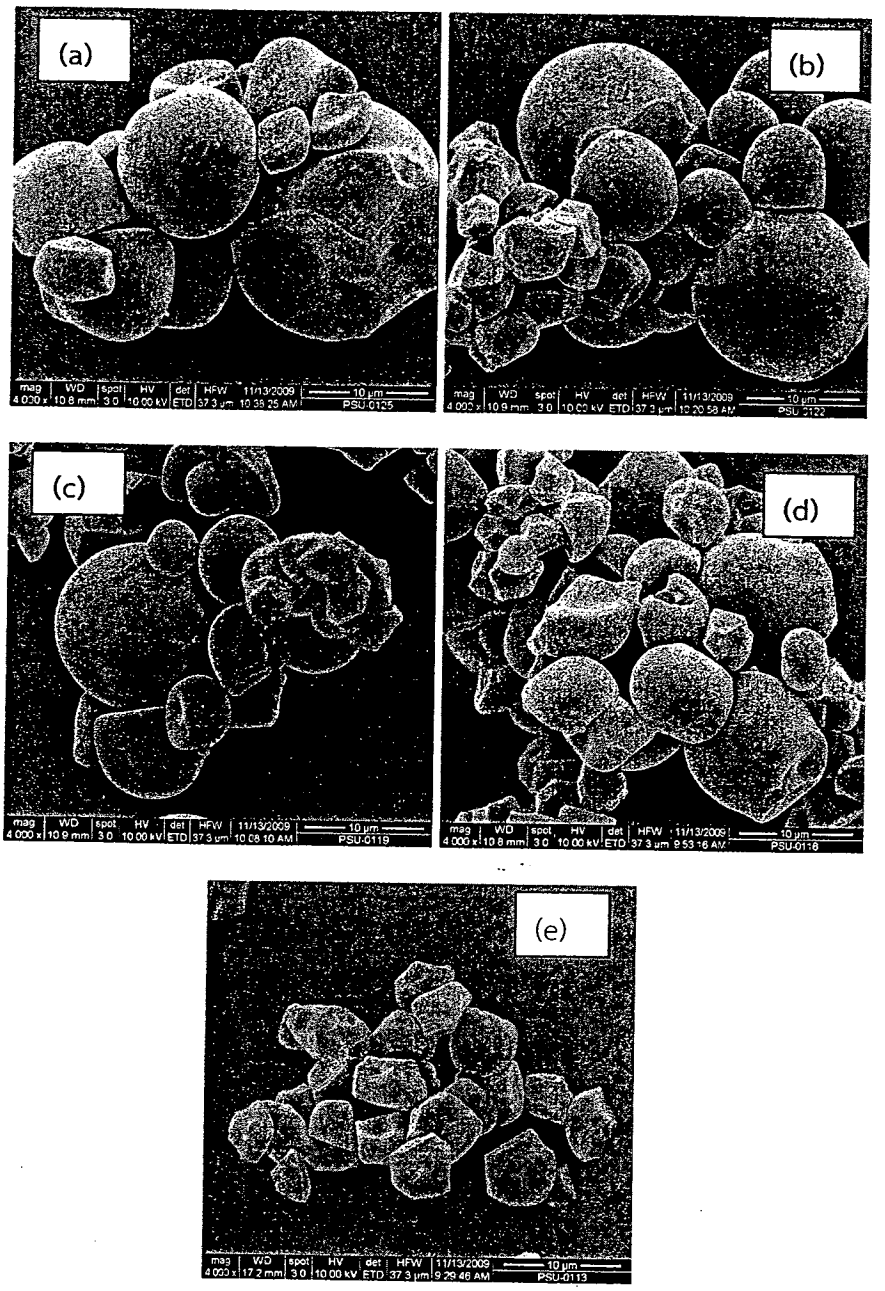
ในการศึกษานี้ไม่ได้วิคราะห์ปริมาณอะมิโลสของสตาร์ชผสม แต่คำนวณตามสัดส่วนและปริมาณของสตาร์ชแต่ละชนิด ได้ผลตารางที่ 4.2 โดยปริมาณอะมิโลสของสตาร์ชผสมจะสูงขึ้นเมื่อสัดส่วนของสตาร์ชข้าวเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.2 ปริมาอะมิโลสของสตาร์ชผสมสัดส่วนต่างๆ

มันสำปะหลัง	ข้าว	ปริมาณอะมิโลส (เปอร์เซ็นต์)
100	0	17.32
90	10	18.38
80	20	19.43
70	30	20.49
60	40	21.54
50	50	22.60
40	60	23.65
30	70	24.71
20	80	25.76
10	90	26.82
0	100	27.87

4.1.2 รูปร่างและขนาดของเม็ดสตาร์ช

ลักษณะรูปร่างและลักษณะของเม็ดสตาร์ช แสดงดังรูปที่ 4.1 โดย สตาร์ชมันสำปะหลังมีรูปร่างกลม ขณะที่เม็ดสตาร์ชข้าวมีรูปร่างเป็นเหลี่ยม

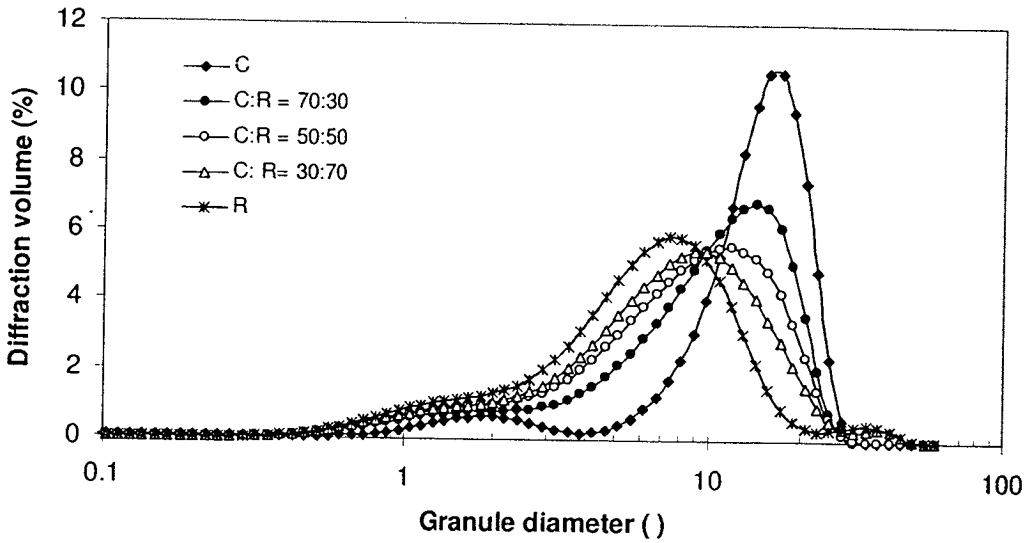


รูปที่ 4.1 SEM micrograph of starch granules (4000X)

C: R (a) = 100:0 (b) =70:30 (c) =50: 50 (d) =30: 70 (e) = 0: 100

สตาร์ชข้าวมีขนาดเล็กกว่าสตาร์ชมันสำปะหลัง มีการกระจายตัวของขนาดเม็ดสตาร์ช (รูปที่ 4.2) โดยพบว่าขนาดเฉลี่ยของเม็ดสตาร์ชข้าว 7.72 ไมโครเมตร จากการศึกษาของ คืนจันทร์ (2552) พบว่าขนาดเฉลี่ยของเม็ดสตาร์ชข้าวพันธุ์เฉี้ยงพัทลุง อยู่ที่ 5.65 ไมโครเมตร สำหรับขนาดเฉลี่ยของเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังคือ 14.57 ไมโครเมตร ซึ่งสูงกว่าที่เคยรายงานก่อนหน้าเล็กน้อย (Tongdang *et al.*, 2008)

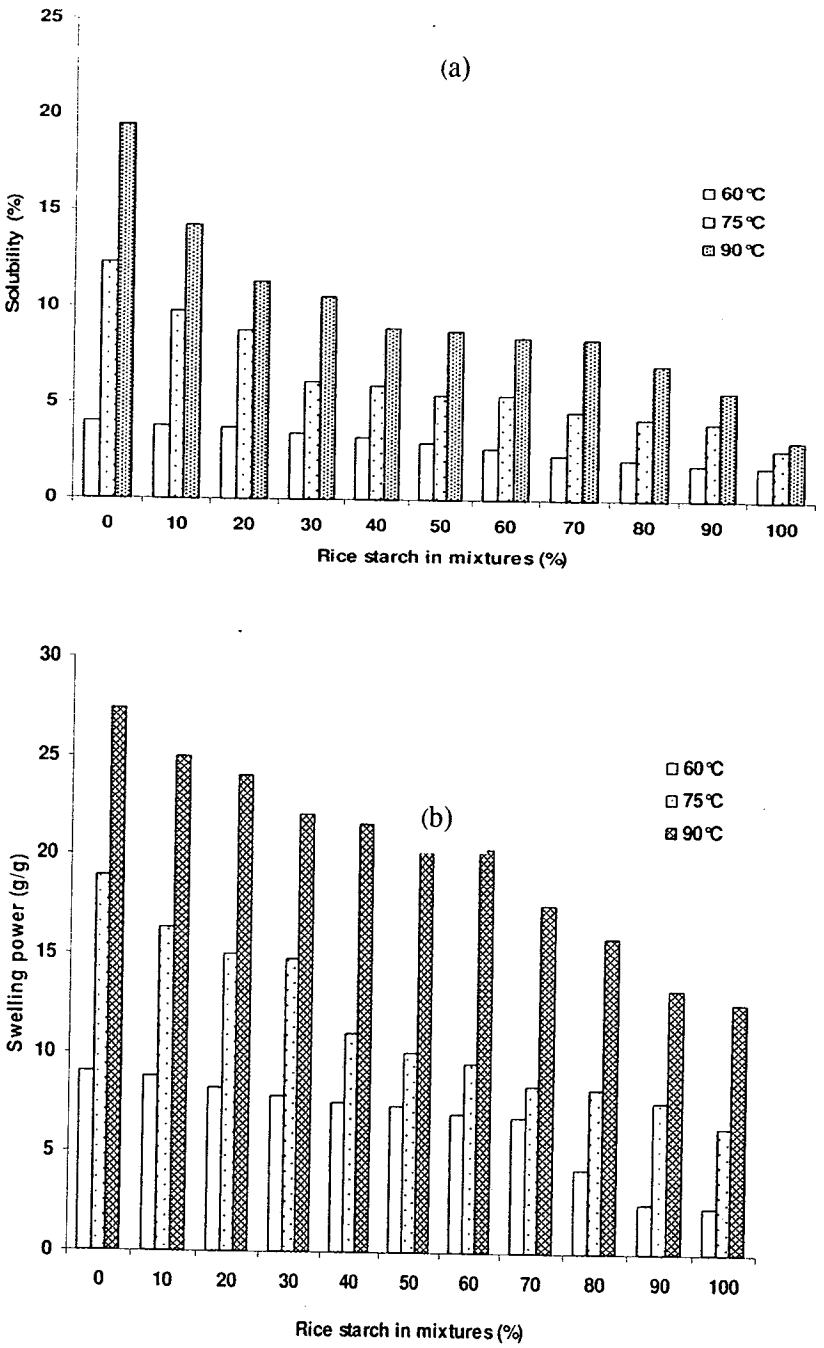
สำหรับสตาร์ชผสมระหว่างสตาร์ชข้าวลัสตาร์ชมันสำปะหลัง พบว่าค่าเฉลี่ยของขนาดเม็ดสตาร์ชอยู่ระหว่างค่าเฉลี่ยของเม็ดสตาร์ชข้าวและสตาร์ชมันสำปะหลัง เช่น สัดส่วน สตาร์ชมันสำปะหลังต่อสตาร์ชข้าว 70: 30, 50: 50 และ 30: 70 ขนาดเม็ดสตาร์ชเฉลี่ย 10.08, 9.67 และ 9.24 ไมโครเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 การกระจายตัวของเม็ดสตาร์ช มันสำปะหลัง (C) สตาร์ชข้าว (R) และสตาร์ชผสมสัดส่วน C:R = 70:30, 50: 50 และ 30: 70

4.1.2 กำลังการพองตัวและความสามารถในการละลาย

กำลังการพองตัวของสตาร์ชและสตาร์ชผสมเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (60 75 90 C) แต่พบว่าสตาร์ชมันสำปะหลังมีกำลังการพองตัวและการละลายสูงกว่ากว่าของสตาร์ชข้าวในทุกอุณหภูมิที่ทดสอบ การให้ความร้อนแก่สตาร์ชในสภาวะที่มีน้ำเพียงพอมีผลให้พันธะไฮโดรเจนเกิดการคลายตัว และเกิดการจับกับโมเลกุลของน้ำทำให้เกิดการพองตัวของเม็ดสตาร์ช รวมถึงอาจเกิดการละลายด้วย ขนาดของเม็ดสตาร์ช สัดส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพคติน รวมถึงความแข็งแรงของโครงสร้างมีผลอย่างมากต่อกำลังการพองตัวและการละลาย สตาร์ชข้าวมีขนาดเม็ดสตาร์ชเล็กกว่าสตาร์ชมันสำปะหลัง รวมทั้งมีโครงสร้างที่แข็งแรงกว่า (โดยสังเกตจากมีอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชั่นที่สูงกว่า) สตาร์ชมันสำปะหลัง การพองตัวและการละลายจึงต่ำกว่า สำหรับสตาร์ชผสมพบว่าเมื่อปริมาณสตาร์ชข้าวเพิ่มขึ้นกำลังการพองตัวและการละลายลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p< 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากสตาร์ชข้าวมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่แข็งแรงกว่า (โดยสังเกตจากมีอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชั่นที่สูงกว่า) และมีขนาดเม็ดสตาร์ชเล็กกว่าสตาร์ชมันสำปะหลัง ทำให้สามารถการดูดซับน้ำและมีการขยายตัวของเม็ดสตาร์ชน้อยว่าสตาร์ชมันสำปะหลัง เมื่อสัดส่วนสตาร์ชข้าวเพิ่มขึ้นค่าดังกล่าวลดลง หากพิจารณาที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่มีค่าการพองตัวสูงสุด พบว่าสตาร์ชผสมที่สัดส่วน (C: R = 70:30 ถึง 40:60) มีค่าใกล้เคียงกัน



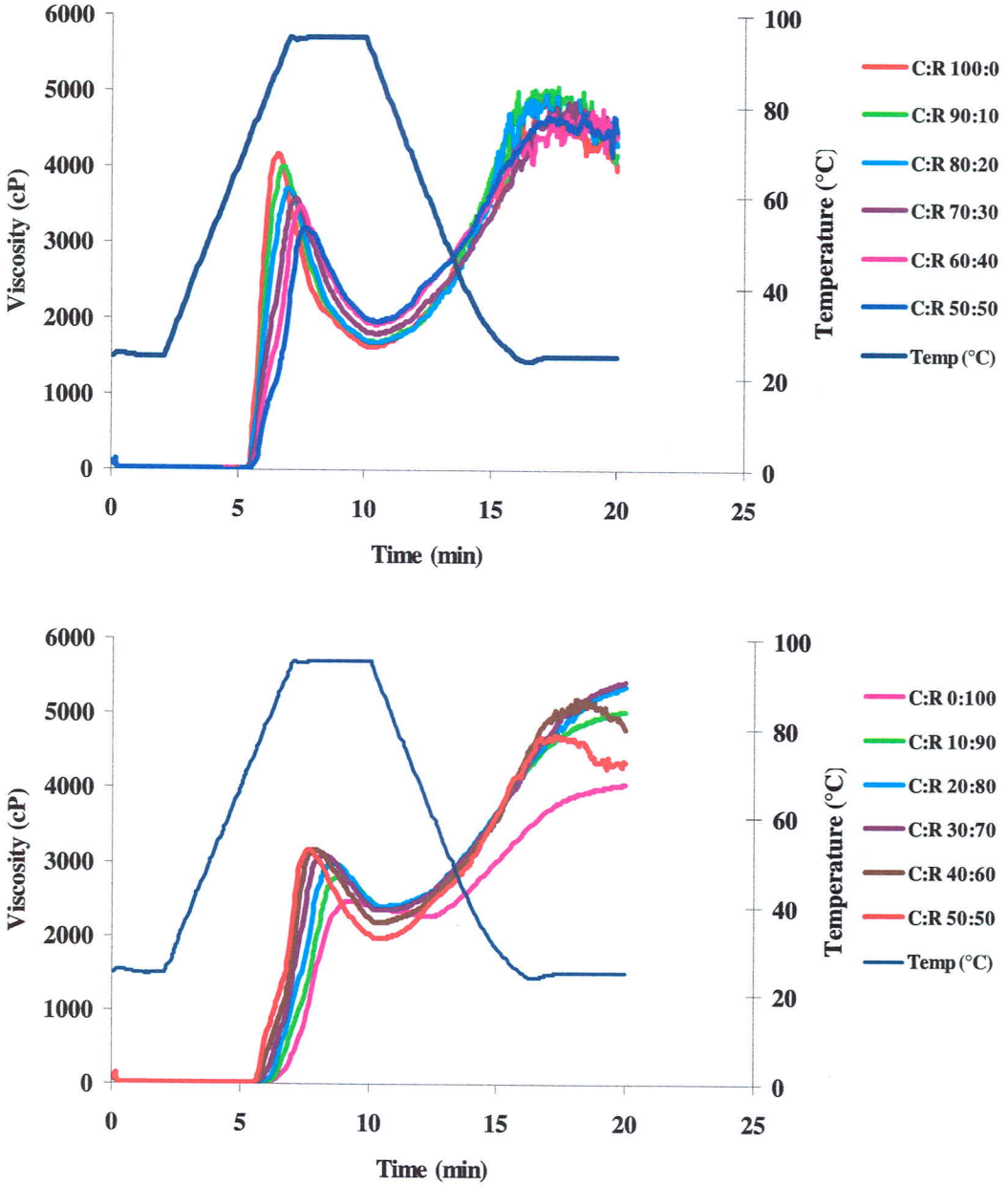
รูปที่ 4.3 ความสามารถในการละลาย (a) และค่ากำลังการพองตัว (b) ของสตาร์ชผสมที่อุณหภูมิ 60 75 และ 90 องศาเซลเซียส

4.1.3 สมบัติการเกิดสตาร์ชเปียก (pasting properties)

สมบัติการเกิดสตาร์ชเปียก (ระหว่างการให้ความร้อนแก่น้ำสตาร์ช) ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความ-หนืด ผลการศึกษาพบว่าลักษณะโปรไฟล์จาก RVA ของสตาร์ชผสมระหว่างสตาร์ชมันสำปะหลังและสตาร์ชข้าวดังรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.3 โดยพบว่า ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ของสตาร์ชมันสำปะหลังมีค่าสูงที่สุดและลดลงตามสัดส่วนของสตาร์ชข้าวที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือความหนืดสูงสุดมีความสัมพันธ์เชิงลบกับปริมาณสตาร์ชข้าวในสตาร์ชผสม ($y = -15.15x + 4052.1$, $R^2 = 0.9742$ เมื่อ y คือ ความหนืดสูงสุด และ x คือปริมาณสตาร์ชข้าวในสตาร์ชผสม) อย่างไรก็ตามสมการนี้ อาจมีความจำเพาะกับชนิดของข้าว (สำหรับการศึกษานี้ เป็นสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลส 27.78 เปอร์เซ็นต์)

สำหรับความหนืดต่ำสุด (through viscosity) ซึ่งเป็นความหนืดที่บ่งชี้ถึงความเสถียร หรือความทนต่อการกวนของเม็ดสตาร์ช พบว่าการเปลี่ยนแปลงเป็นไปในทางตรงข้ามกับความหนืดสูงสุด คือมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสตาร์ชข้าวในสตาร์ชผสมเพิ่มขึ้นกล่าวคือมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกแบบเส้นตรง ($y = 8.7644x + 1568.7$, $R^2 = 0.906$ เมื่อ y คือความหนืดต่ำสุด และ x คือปริมาณสตาร์ชข้าวในสตาร์ชผสม) ทั้งนี้เนื่องจากสตาร์ชข้าวมีโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชที่แข็งแรงและมีขนาดเม็ดสตาร์ชเล็กกว่าเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลัง การแตกหักเนื่องจากแรงเฉือน (การกวนของใบพัด) น้อยกว่าความหนืดจึงไม่ลดลง ทั้งนี้จะเห็นได้ชัดเจนว่าความหนืดต่ำสุดของสตาร์ชมันสำปะหลังมีค่าต่ำกว่าของสตาร์ชข้าว

ความหนืดสุดท้าย (final viscosity, fv) ที่บ่งชี้ถึงความสามารถในการจัดเรียงตัวของสายโมเลกุลหลังจากผ่านการเกิดเจลาติไนเซชั่น หรือการเกิดรีโทรเกรเดชั่น จากผลการทดลองพบว่าความหนืดสุดท้ายของสตาร์ชมันสำปะหลัง ใกล้เคียงกับสตาร์ชข้าว (ประมาณ 4000 เซ็นติพ้อยท์) แต่สำหรับสตาร์ชผสมของ 2 ชนิดนี้พบว่า ค่าดังกล่าวสูงกว่าสตาร์ชเดี่ยว โดยความหนืดสุดท้ายของสตาร์ชผสมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสตาร์ชข้าวสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่าสตาร์ชผสมที่มีปริมาณสตาร์ชมันสำปะหลังในระดับ 10-30 เปอร์เซ็นต์ และ สตาร์ชข้าว 90-70เปอร์เซ็นต์ ความหนืดสุดท้ายเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก (มากกว่าสตาร์ชเดี่ยว $\geq$ 1000 เซ็นติพอยท์) ความหนืดสุดท้ายบ่งชี้ถึงความแข็งแรงของเจลอันเนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชั่นของสตาร์ช หากปริมาณอะมิโลสของสตาร์ชสูง ความหนืดสุดท้ายน่าจะสูงตามไปด้วย ในการทดลองนี้สตาร์ชข้าวมีปริมาณอะมิโลสสูงกว่าสตาร์ชผสมแต่ความหนืดสุดท้ายต่ำกว่า ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจึงน่าจะมีอิทธิพลของการจัดเรียงของเม็ดสตาร์ชที่ขนาดต่างกันของสตาร์ชผสมสองชนิด มากกว่าอิทธิพลของปริมาณอะมิโลส กล่าวคือเม็ดสตาร์ชข้าวที่มีขนาดเล็กกว่าจะแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังที่มีขนาดใหญ่กว่า ทำให้มีความหนาแน่น (packing density) ที่สูงกว่า การพองตัวของสตาร์ชทั้งสองชนิดในกระบวนการเจลาติไนซ์แตกต่างกันกล่าวคือ มันสำปะหลังน่าจะพองตัวและขยายขนาดได้มากกว่า หลังการอุณหภูมิ โครงสร้างเจลแป้งผสมน่าจะมีความหนาแน่นและแข็งแรงกว่า ส่งผลให้ความหนืดสุดท้ายสูงกว่าแป้งเดี่ยวๆ



รูปที่ 4.4 ลักษณะรูปแบบการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชผสมระหว่างสตาร์ชมันสำปะหลัง (C) และสตาร์ชข้าว (R)

ตารางที่ 4.3 ค่าความหนืดของสตาร์ชผสมในระหว่างการเกิดเพสต์ ที่วัดด้วยเครื่อง RVA

C: R	Viscosity (cP)					Peak Time (min)
	Hot Peak	Trough	Breakdown	Final	Setback	
100:0	4141^{j}±25	1611^{a}±19	2531^{k}±6	4084^{ab}±6	2474^{b}±112	6.53^{a}±0.00
90:10	3945^{i}±44	1651^{ab}±32	2295^{j}±12	4228^{bc}±50	2577^{bc}±259	6.77^{b}±0.08
80:20	3692^{h}±25	1684^{b}±1	2009^{g}±26	4317^{c}±176	2633^{bc}±74	7.00±0.00^{c}
70:30	3554^{g}±57	1775^{c}±20	1779^{h}±28	4480^{d}±143	2705^{cd}±137	7.27^{d}±0.00
60:40	3421^{f}±58	1876^{d}±43	1546^{g}±17	4398^{c}±4	2522^{bc}±88	7.27^{e}±0.00
50:50	3160^{e}±30	1964^{e}±3	1196^{f}±33	4428^{c}±78	2465^{bc}±79	7.69^{f}±0.03
40:60	3105^{de}±68	2176^{f}±6	929^{e}±74	4743^{e}±155	2566^{bc}±60	7.91^{g}±0.03
30:70	3038^{d}±46	2315^{g}±27	723^{d}±27	5389^{g}±39	3074^{c}±82	8.25^{h}±0.04
20:80	2933^{c}±37	2375^{h}±24	558^{c}±13	5293^{g}±85	2918^{de}±64	8.62^{i} ±0.04
10:90	2804^{b}±12	2500^{i}±28	403^{b}±36	5009^{f}±64	2610^{bc}±18	8.95^{j}±0.04
0:100	2447^{a}±21	2249^{j}±13	198^{a}±8	3964^{a}±70	1714^{a}±150	9.31^{k}±0.07

Mean value±standard deviation of triplicates.

Mean value in the same column with different letter are significantly different ($p<0.05$)

4.1.4 อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชั่น

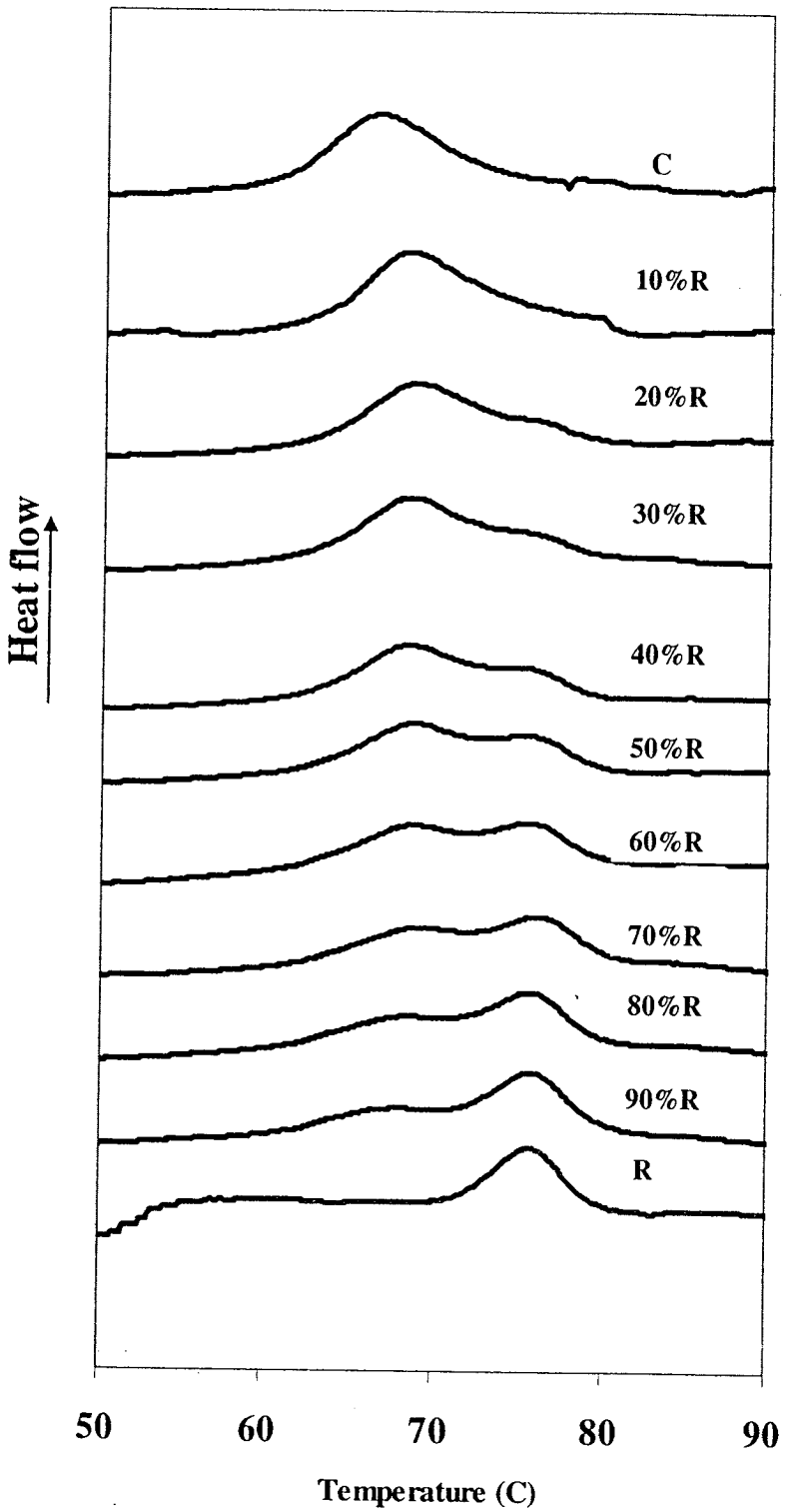
ลักษณะของโปรไฟล์ของการเกิดเจลาติไนซ์ของการเกิดเจลาติไนเซชั่นของสตาร์ชมันสำปะหลังและสตาร์ชข้าวเกิดพีค (แสดงการเปลี่ยนแปลงความร้อน ดังรูปที่ 4.5) เพียงพีคเดียวขณะที่ของสตาร์ชผสมจะปรากฏสองพีค โดยที่ขนาดของพีคที่สองจะเห็นชัดเจนขึ้นเมื่อปริมาณสตาร์ชข้าวเพิ่มขึ้น ดังนั้น T_p ในสตาร์ชผสมจะมี 2 ค่า ดังตารางที่ 4.4 ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชั่นของสตาร์ชมันสำปะหลังต่ำ (62-73องศาสเซลเซียส) และแคบกว่าของสตาร์ชข้าว (70-80 องศาเซลเซียส) ขณะที่อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชั่นของสตาร์ชผสมจะครอบคลุมช่วงอุณหภูมิของสตาร์ชทั้ง 2 ชนิด และพบว่าพีคที่แสดงอุณหภูมิสูงสุด 2 ค่า โดยค่า T_{p1} และ T_{p2}ของสตาร์ชผสมมีค่าใกล้เคียงกับ T_{p1}ของสตาร์ชมันสำปะหลังและสตาร์ชข้าวตามลำดับ ผลการศึกษานี้ สอดคล้องกับ รายงานของ Ortega-Ojeda and Eliasson (2001) ที่พบว่าอุณหภูมิสูงสุดของการเกิดเจลาติไนเซชั่นของสตาร์ชผสม จะเป็นการแสดงออกของสตาร์ชทั้ง สองชนิดซึ่งไม่มีการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกัน

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิและค่าพลังงานการเกิดเจลาติไนเซชั่น ของสตาร์ชผสมระหว่างสตาร์ชมัน-สำปะหลัง (C) และสตาร์ชข้าว (R)

C:R	T_o	T_{p1}	T_{p2}	T_c	ΔH
100:0	$61.85^{a}\pm0.12$	$66.41^{a}\pm0.12$	-	$73.33^{a}\pm0.14$	12.12 ± 0.11
90:10	$62.58^{c}\pm0.05$	$68.83^{b}\pm0.00$	-	$76.09^{b}\pm0.02$	13.30 ± 0.55
80:20	$62.40^{c}\pm0.01$	$68.83^{b}\pm0.00$	$74.00^{a}\pm0.00$	$76.43^{b}\pm0.12$	13.11 ± 0.14
70:30	$62.88^{bc}\pm0.29$	$68.58^{b}\pm0.35$	$76.33^{c}\pm0.47$	$80.06^{c}\pm0.62$	13.42 ± 0.58
60:40	$62.84^{bc}\pm0.21$	$68.91^{b}\pm0.35$	$76.41^{c}\pm0.12$	$80.04^{c}\pm0.21$	12.65 ± 0.17
50:50	$63.12^{b}\pm0.22$	$69.08^{bc}\pm0.11$	$75.74^{b}\pm0.12$	$80.32^{c}\pm0.00$	12.54 ± 0.22
40:60	$62.91^{b}\pm0.91$	$69.16^{bc}\pm0.23$	$75.49^{b}\pm0.47$	$80.21^{c}\pm0.01$	12.45 ± 1.97
30:70	$62.18^{b}\pm0.01$	$69.50^{bc}\pm0.00$	$76.00^{bc}\pm0.00$	$80.32^{c}\pm0.05$	11.55 ± 0.02
20:80	$62.43^{ab}\pm0.69$	$69.41^{bc}\pm0.34$	$76.08^{bc}\pm0.11$	$80.29^{c}\pm0.17$	11.17 ± 1.91
10:90	$62.78^{a}\pm0.47$	$68.50^{b}\pm0.00$	$75.99^{b}\pm0.23$	$80.14^{c}\pm0.26$	12.50 ± 1.10
0:100	$70.54^{ab}\pm0.09$	$76.16^{c}\pm0.00$	-	$80.22^{c}\pm0.02$	10.68 ± 0.07

Mean value±standard deviation of triplicates.

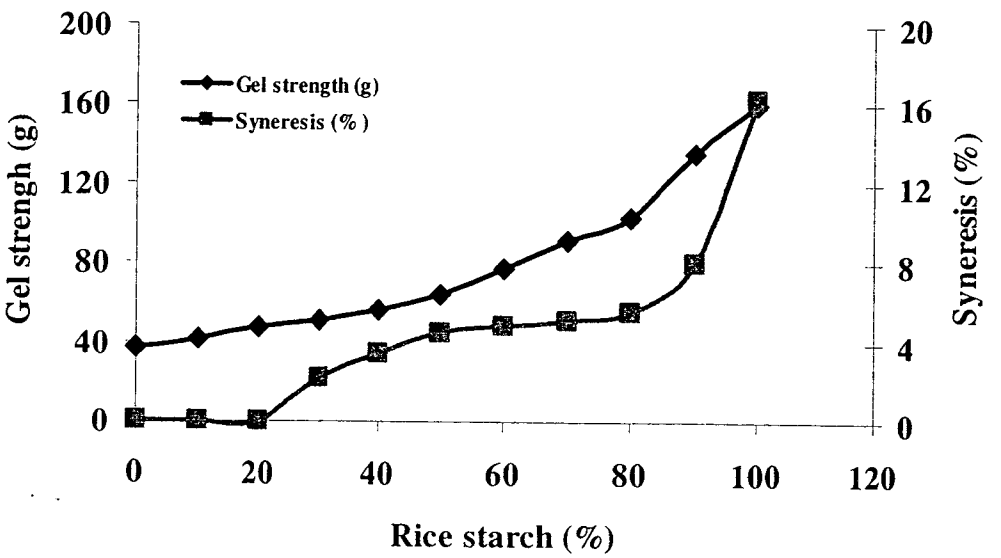
Mean value in the same column with different letter are significantly different ($p<0.05$)



รูปที่ 4.5 ลักษณะเทอร์โมแกรมของการเกิดเจลาติไนซ์ของสตาร์ชมันสำปะหลัง (C) สตาร์ชข้าว (R) และสตาร์ชผสมของสตาร์ชทั้งสองชนิดนี้ที่มีปริมาณสตาร์ชข้าวในระดับต่างๆ จากการทดสอบด้วยเครื่อง DSC

4.1.5 ความแข็งแรงของเจลและการขับน้ำออกจากเจล

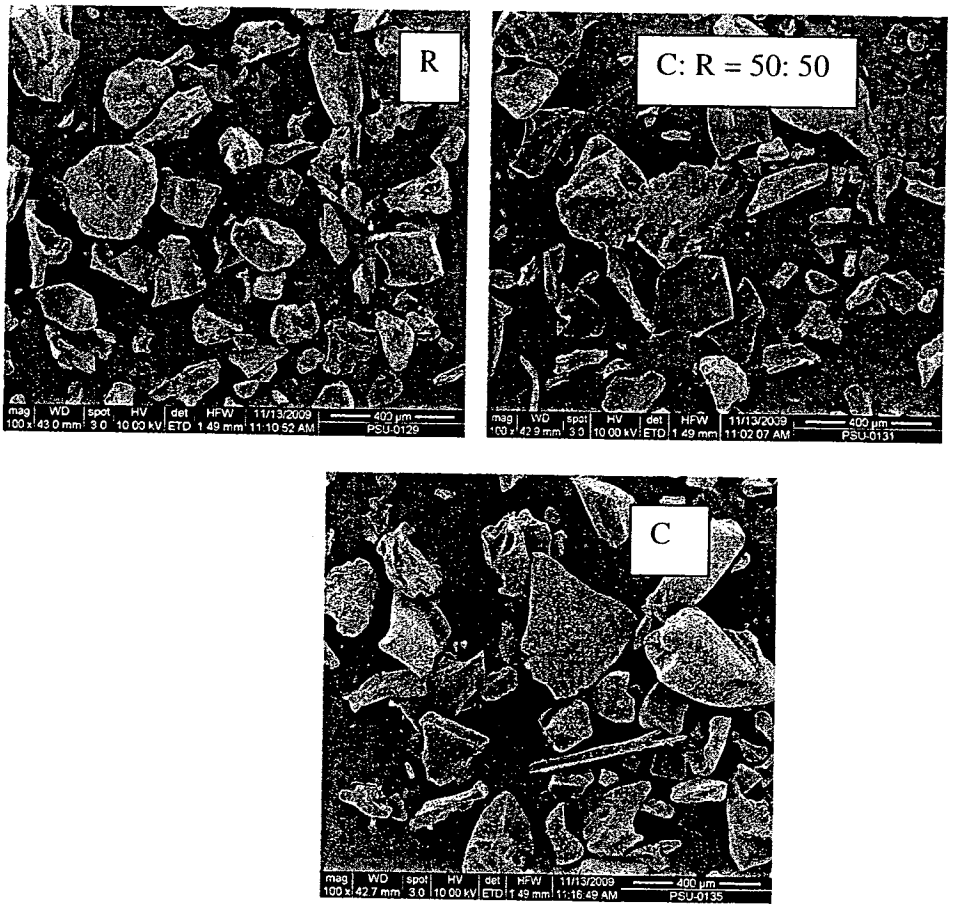
สตาร์ชมันสำปะหลังมีความแข็งแรงของเจลและค่าการขับน้ำออกจากเจลต่ำกว่าสตาร์ชข้าว ค่าดังกล่าวของสตาร์ชผสมก็มีค่าต่ำกว่าของสตาร์ชข้าว ความแข็งแรงของเจลและการขับน้ำออกจากเจลสูงขึ้นเมื่อปริมาณสตาร์ชข้าวในสตาร์ชผสมสูงขึ้น (หรือมีค่าลดลงเมื่อปริมาณสตาร์ชมันสำปะหลังในสตาร์ชผสมเพิ่มสูงขึ้น) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยพบว่าในสตาร์ชผสมที่มีสตาร์ชมันสำปะหลัง 10-20 เปอร์เซ็นต์ และมีสตาร์ชข้าว 90-80 เปอร์เซ็นต์ มีการเกิดการขับน้ำออกจากเจลต่ำมาก และไม่ต่างไปจากสตาร์ชมันสำปะหลังแต่มีความแข็งแรงของเจลสูงกว่า จากผลการศึกษาที่ได้นี้น่าจะเกิดประโยชน์ในการประยุกต์ใช้สตาร์ชผสมดังกล่าว กล่าวคือในระบบอาหารที่ต้องการเจลที่มีความหนืดสูงแต่มีการขับน้ำออกจากเจลน้อย



รูปที่ 4.6 ผลของปริมาณสตาร์ชข้าวในสตาร์ชผสมต่อความแข็งแรงของเจลและการขับน้ำออกจากเจลของสตาร์ชผสมระหว่างสตาร์ชมันสำปะหลัง (C)และสตาร์ชข้าว (R)

4.2 สตาร์ชผสมพรีเจล

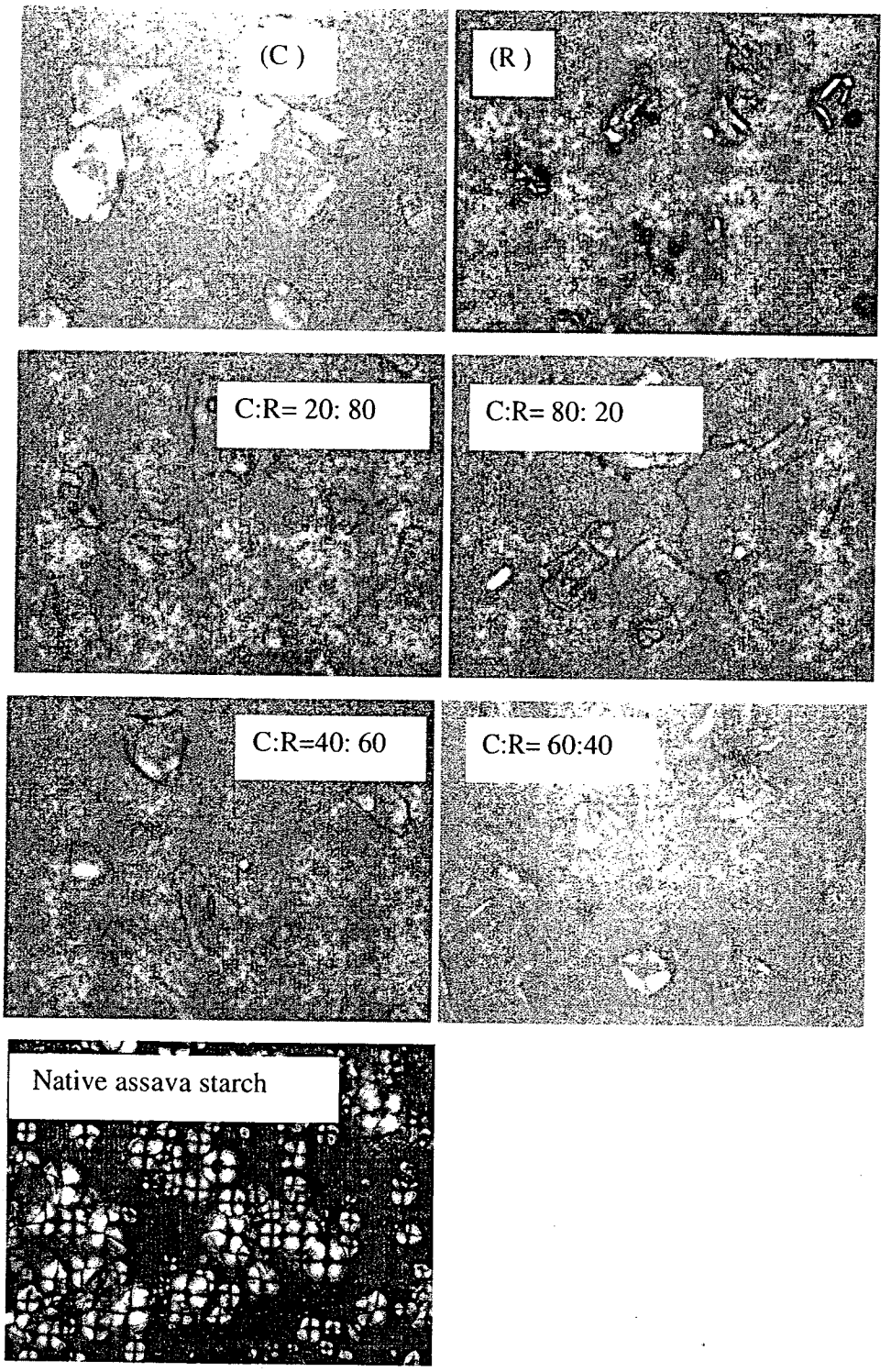
สตาร์ชผสมระหว่างสตาร์ชมันสำปะหลังและสตาร์ชข้าวผ่านกระบวนการพรีเจลาติไนซ์ โดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ เปรียบเทียบกับสตาร์ชข้าวและสตาร์ชมันสำปะหลัง ตัวอย่างที่ได้ผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรง นำตัวอย่างที่อยู่ในช่วง 150-450 ไมโครเมตร วิเคราะห์สมบัติต่างๆ ลักษณะของสตาร์ชพรีเจลภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเลกตรอนแบบส่องกราด ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ลักษณะสตาร์ชพรีเจลที่ถ่ายด้วยกล้อง SEM สตาร์ชมันสำปะหลังพรีเจล (C) สตาร์ชข้าวพรีเจล (R) และสตาร์ชผสม C:R: 50: 50

4.2.1 การสูญเสียความเป็นผลึกของสตาร์ชผสมพรีเจล

โดยทั่วไปแล้วเม็ดสตาร์ชมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) ซึ่งสามารถตรวจสอบความเป็นผลึกของสตาร์ชได้โดยการตรวจการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาร์ไรซ์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ซึ่งจะมองเห็นลักษณะมอลติสครอสหรือลักษณะคล้ายกากบาทดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยบริเวณสว่างคือส่วนที่เป็นผลึก ขณะที่บริเวณสีทึบคือส่วนที่เป็นอสัณฐาน



รูปที่ 4.8 ลักษณะของสตาร์ชพรีเจลภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาร์ไรซ์ บ่งชี้ถึงการสูญเสียโครงสร้างผลึกของสตาร์ช (C สตาร์ชมันสำปะหลัง; R สตาร์ชข้าว)

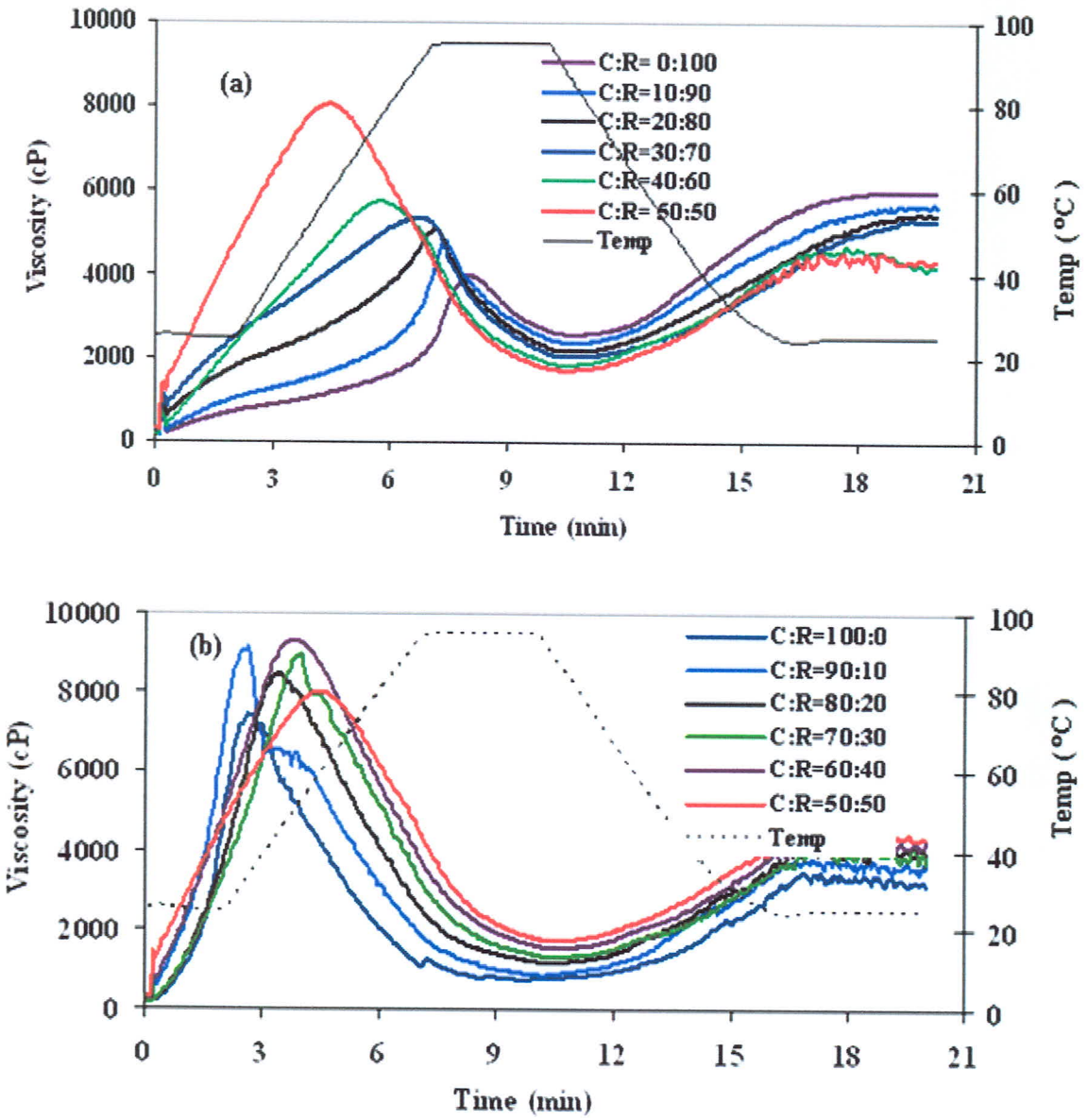
4.2.2 การเปลี่ยนแปลงความหนืด

การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชผสมพรีเจลที่ทดสอบด้วยเครื่อง RVA (จากอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และลดลงเป็น 25 องศาเซลเซียส) แสดงในรูปที่ 4.9 ค่าต่างๆที่ได้แสดงในตารางที่ 4.5 จากผลการทดสอบพบว่าสตาร์ชผสมในสัดส่วนต่างกันมีโปรไฟล์ของการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่ต่างกัน (รูปที่ 4.9) จากโปรไฟล์ เมื่อพิจารณาจากพีคของความหนืด จะเห็นว่าสตาร์ชผสมที่สัดส่วนสตาร์ชข้าว 60-100 เปอร์เซ็นต์ (พิจารณาจากจุดสูงสุด) จะต่ำกว่าสัดส่วน 50: 50 และ สตาร์ชผสมที่สัดส่วนสตาร์ชมันสำปะหลัง 60-90 เปอร์เซ็นต์ (พิจารณาจากจุดสูงสุด) สูงกว่าจะต่ำกว่าสัดส่วน 50: 50 และสตาร์ชมันสำปะหลัง (100 เปอร์เซ็นต์) พรีเจล ค่าความหนืดต่างๆ แสดงตาราง ที่ 4.5

ความหนืดที่อุณหภูมิต่ำ (Cold peak viscosity, CPV) เป็นค่าความหนืดสูงสุดที่เกิดขึ้นในระยะเวลา 0-2.33 นาทีแรกของการทดสอบ (ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) เป็นความหนืดที่บ่งชี้ถึงความสามารถของการจับกับน้ำของสตาร์ชพรีเจลาติไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำ (Whalen *et al.*, 1997) ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญของสตาร์ชพรีเจลที่ต่างจากสตาร์ชดิบ และนำไปใช้ประโยชน์กับกลุ่มผลิตภัณฑ์ต่างๆที่ไม่ต้องผ่านการให้ความร้อน

จากการศึกษาพบว่าสัดส่วนของสตาร์ชผสมมีผลต่อค่า CPV อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยสตาร์ชข้าวพรี-เจล มีค่า PV 720 เซ็นติพอยต์ ซึ่งต่ำกว่าค่าของสตาร์ชมันสำปะหลังพรี-เจล (4314 เซ็นติพอยต์) และเมื่อปริมาณสตาร์ชข้าวในสตาร์ชผสมเพิ่มขึ้นเป็น 10-20 เปอร์เซ็นต์ มีผลให้ค่าองศาเซลเซียส ค่า CPV เพิ่มขึ้นสูงสุดคือมีค่า 8473-8118 เซ็นติพอยต์ และค่า CPV ลดลงเมื่อปริมาณสตาร์ชข้าวในสตาร์ชผสมเพิ่มขึ้นสูงกว่าปริมาณนี้ อย่างไรก็ตามค่ายังคงสูงกว่าค่าของสตาร์ชข้าวพรีเจลเดี่ยว อาจอธิบายได้ว่าในสตาร์ชผสมที่มีสัดส่วนของสตาร์ชข้าวน้อย (10-20 เปอร์เซ็นต์) สตาร์ชข้าวทำหน้าที่เสมือนเป็นสารตัวเติม และส่งเสริมให้ความหนืดที่อุณหภูมิต่ำสูงกว่าสตาร์ชข้าวพรีเจล และสตาร์ชมันสำปะหลังพรีเจลเดี่ยวๆ อีกทั้งสามารถดูดซับน้ำและความหนืดสูงขึ้นอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลาเพียงประมาณ 3 นาที (สังเกตจากค่า peak time)

ในขั้นตอนการผลิตสตาร์ชพรีเจลที่ให้ความร้อนที่อุณหภูมิผิวหน้าลูกกลิ้ง 110 องศาสเซลเซียส) สตาร์ชมันสำปะหลังน่าจะเกิดการเจลาติไนเซชั่นได้ง่ายกว่าสตาร์ชข้าว เนื่องจากมีอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนซ์ที่ต่ำกว่า (62 องศาเซลเซียส) สตาร์ชข้าว (70 องศาเซลเซียส) ประกอบกับมีปริมาณอะมิโลเพคตินสูงกว่าสตาร์ชข้าว จึงน่าจะมีระดับการเกิดเจลาติไนเซชั่นและการถูกทำลายสูงกว่าสตาร์ชข้าวเมื่อสตาร์ชผ่านกระบวนการดัดแปรทางกายภาพ เช่นกระบวนการใช้ความร้อนระดับอุณหภูมิเจลาติไนเซชั่นหรือกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น ส่วนของโมเลกุลอะมิโลเพคตินในสตาร์ชจะถูกทำลายหรือ เกิดการแตกหักง่ายกว่าโมเลกุลของอะมิโลส ส่งผลต่อสมบัติต่างๆของสตาร์ชดัดแปรที่ได้ เช่นความหนืดระหว่างการเกิดเพสต์ และการดูดซับและการละลายที่อุณหภูมิห้อง (Tongdang, 2001)



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชผสมพรีเจลระหว่างสตาร์ชมันสำปะหลัง (C) และสตาร์ชข้าวอะมิโลสสูง (R) ในสัดส่วนต่างๆ

ตารางที่ 4.5 สมบัติทางด้านความหนืดของสตาร์ชผสมพรีเจลระหว่างสตาร์ชมันสำปะหลัง (C) และสตาร์ชข้าวอะมิโลส (R)

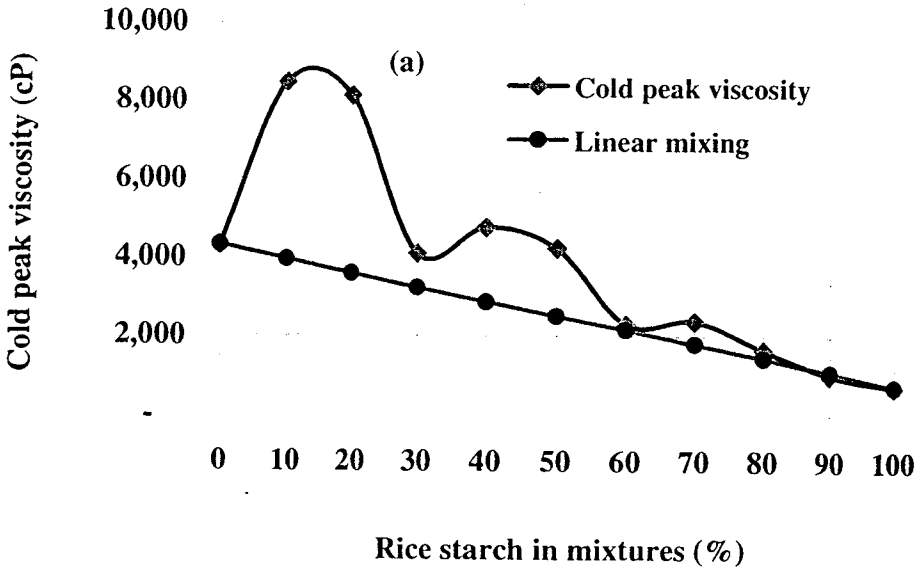
C: R	Visosity (cP)						Peak Time (min)	Pasting Temp (°C)
	Cold Peak	Hot Peak	Trough	Breakdown	Final	Setback		
100:0	$4314^{d}\pm1388$	$6956^{e}\pm748$	$774^{a}\pm26$	$6182^{e}\pm744$	$3097^{a}\pm145$	$2323^{a}\pm153$	$2.82^{b}\pm0.44$	25.03^{ns}
90:10	$8473^{e}\pm332$	$9308^{h}\pm130$	$852^{b}\pm26$	$8457^{h}\pm106$	$3679^{b}\pm67$	$2828^{d}\pm68$	$2.38^{a}\pm0.14$	25.00^{ns}
80:20	$8118^{d}\pm117$	$9792^{h}\pm59$	$960^{c}\pm19$	$8832^{g}\pm46$	$3968^{c}\pm139$	$3008^{d}\pm127$	$2.65^{c}\pm0.04^{c}$	25.07^{ns}
70:30	$4100^{d}\pm220$	$9572^{h}\pm170$	$1296^{d}\pm3$	$8276^{g}\pm168$	$3808^{b}\pm159$	$2511^{bc}\pm159$	$3.84^{d}\pm0.10^{d}$	25.03^{ab}
60:40	$4774^{d}\pm243$	$9164^{g}\pm257$	$1543^{e}\pm7$	7621 ± 259^{f}	$4081^{c}\pm180$	$2538^{bc}\pm187$	$3.82^{d}\pm0.10$	25.00^{ns}
50:50	$4246^{d}\pm376$	$7954^{f}\pm69$	$1731^{f}\pm5$	$6222^{e}\pm69$	$4344^{e}\pm7$	$2613^{c}\pm13$	$4.56^{e}\pm0.08$	25.03^{ns}
40:60	$2305^{c}\pm260$	$5727^{d}\pm31$	$1862^{g}\pm10$	$3865^{d}\pm21$	$4229^{de}\pm9$	$2367^{ab}\pm14$	$5.73^{f}\pm0.07$	25.00^{ns}
30:70	$2386^{c}\pm204$	$5293^{c}\pm37$	$2040^{h}\pm30$	$3253^{c}\pm40$	5243 ± 54^{f}	$3203^{e}\pm36$	$6.71^{g}\pm0.04$	25.03^{ns}
20:80	$1659^{bc}\pm99$	$5114^{bc}\pm27$	$2197^{i}\pm12$	$2917^{c}\pm37$	$5515^{g}\pm69$	$3318^{e}\pm76$	$7.18^{h}\pm0.04$	25.00^{ns}
10:90	$1010^{ab}\pm22$	$4751^{ab}\pm32$	$2403^{j}\pm25$	$2348^{b}\pm42$	$5634^{g}\pm24$	$3231^{e}\pm11$	$7.45^{i}\pm0.04$	25.00^{ns}
0:100	$720^{a}\pm53$	3999 ± 10^{a}	$2565^{k}\pm35$	$1434^{a}\pm41$	$5983^{h}\pm28$	$3417^{f}\pm20$	$7.95^{j}\pm0.04$	25.05^{ns}

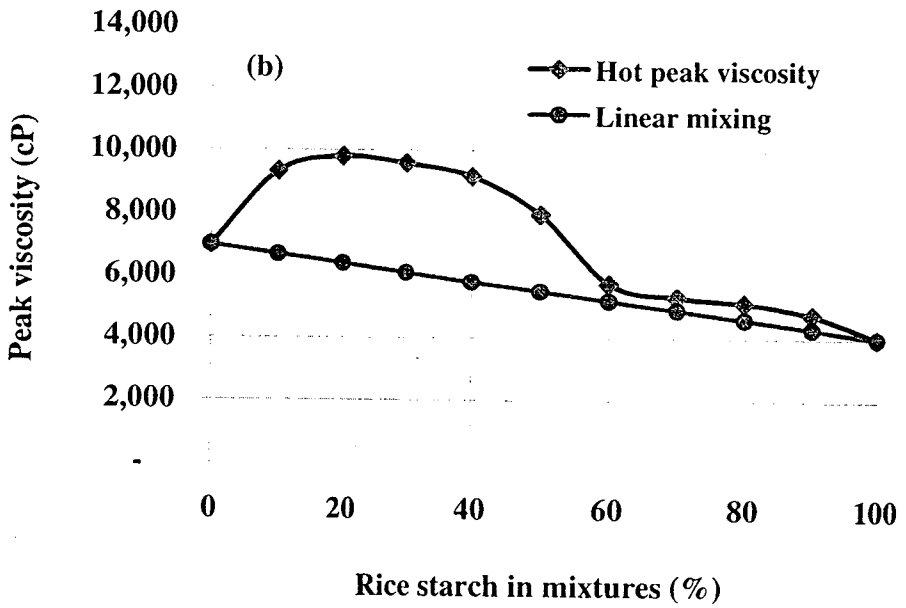
Mean value ± standard deviation of triplicates.

Mean value in the same column with different letter are significantly different ($p<0.05$)

ค่าความหนืดสูงสุด (Hot peak visองศาสเซลเซียสosity, HPV) เป็นค่าความหนืดสูงสุดที่เกิดขึ้นในช่วงเพิ่มอุณหภูมิเป็น จาก 25 เป็น 95องศาสเซลเซียส จากตาราง 4.5 พบว่าค่า HPV ของสตาร์ชข้าวพรีเจลมีค่า 3999 เซ็นติพอยต์ ซึ่งต่ำกว่าค่าของสตาร์ชมันสำปะหลังพรีเจล (6956.00 เซ็นติ-พอยต์) นอกจากนี้สัดส่วนของสตาร์ชผสมมีผลต่อค่า HPV อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางภาคผนวก ข.1) สตาร์ชผสมพรีเจล (ทุกสัดส่วน) มีค่า HPV สูงกว่าสตาร์ชข้าวพรีเจล แต่เฉพาะสตาร์ชผสมที่มีสตาร์ชมันสำปะหลังปริมาณ 50-90 เปอร์เซ็นต์และมีสตาร์ชข้าว 10-50เปอร์เซ็นต์ มีความหนืดสูงกว่าสตาร์ชมันสำปะหลังพรีเจลเดี่ยวๆ เมื่อปริมาณสตาร์ชข้าวในสตาร์ชผสมเพิ่มขึ้น (60 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป) ค่า HPV มีค่าลดลง จากการทดลองนี้พบว่าชุดการทดลองที่มีปริมาณสตาร์ชข้าว 10-40 เปอร์เซ็นต์ มีค่า HPV ใกล้เคียงกัน (9100-9700 เซ็นติพอยต์) และสูงกว่าชุดการทดลองอื่นๆ ทั้งหมด จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลง HPV คล้ายคลึงกับ CPV กล่าวคือ สตาร์ชข้าวในสตาร์ชผสมช่วยสนับสนุนให้ความหนืดสูงขึ้น กว่าสตาร์ชเดี่ยวๆ โดยเฉพาะสูงกว่าสตาร์ชมัน

ผลของสัดส่วนสตาร์ชผสมต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชผสมพรีเจล (ทั้ง CPV และ HPV) เป็นไปในลักษณะที่เป็นความสัมพันธ์แบบไม่เป็นส้นตรง (non-linear) ดังรูปที่ 4.10 ดังนั้นจึงไม่สามารถคาดการณ์หรือทำนายความหนืดของสตาร์ชผสมพรีเจลจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสตาร์ชในสตาร์ชผสมกับความหนืดทั้ง 2 แบบได้ ชนิดและสัดส่วนสตาร์ชรวมถึงกระบวนการและสภาวะการให้ความร้อนในระหว่างพรีเจลาติไนซ์ เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลของการเปลี่ยนแปลงสมบัติของสตาร์ชผสมพรีเจลที่ได้



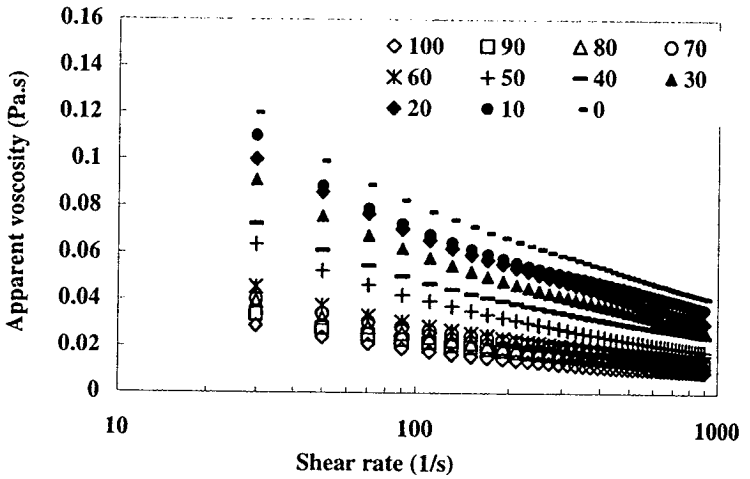


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสตาร์ชข้าวในสตาร์ชผสมพรีเจลกับการเปลี่ยนแปลงความหนืด (a) Cold peak viscosity (b) hot peak viscosity

สำหรับค่าความหนืดต่ำสุด (Through viscosity) และความหนืดสุดท้าย (Final vicosity, FV) สตาร์ชข้าวพรีเจล มีค่าสูงสุด และสตาร์ชมันสำปะหลัง มีค่าต่ำสุด โดยสัดส่วนของสตาร์ชผสมมีผลต่อค่าดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญ (ตารางภาคผนวก ข.1) ค่าความหนืดทั้งสองค่านี้มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกันคือเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสตาร์ชข้าวเพิ่มขึ้น (หรือปริมาณสตาร์ชมันสำปะหลังลดลง)
เมื่อสัดส่วนของสตาร์ชมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นมีผลให้ค่า FV ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ความหนืดสุดท้ายเป็นความหนืดของตัวอย่างเมื่อมีการลดอุณหภูมิลงเป็น 25 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิที่ลดลงทำให้เกิดกลับมาจัดเรียงตัวของโมเลกุลอะมิโลสซึ่งมีผลให้เจลแข็งแรงขึ้นและความหนืดเพิ่มขึ้นถ้ามีปริมาณอะมิโลสสูงทำให้ค่าความหนืดเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจากตารางที่ 4.5 สตาร์ชข้าวมีปริมาณอะมิโลสสูงกว่าสตาร์ชมันสำปะหลังจึงทำให้เกิดการรีโทรเกรเดชันได้ดีกว่าและเมื่อสัดส่วนที่มีสตาร์ชข้าวเพิ่มมากขึ้นการเกิดรีโทรเกรเดชันก็เพิ่มสูงขึ้นด้วยจึงส่งผลให้ค่าความหนืดสุดท้ายของสตาร์ชผสมสูงขึ้นเมื่อปริมาณสตาร์ชข้าวเพิ่มขึ้น

4.2.3 พฤติกรรมการไหล

สตาร์ชพรีเจลทุกชุดการทดลอง แสดงพฤติกรรมการไหล แบบ shear thinning เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Na Na khon *et al.* (2009) โดยความหนืดปรากฏของสตาร์ชข้าวพรีเจลมีค่าต่ำสุดและค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสตาร์ชมันสำปะหลังในสตาร์ชผสมเพิ่มขึ้นและสตาร์ชมันสำปะหลังพรีเจลมีความหนืดสูงสุด



รูปที่ 4.11 พฤติกรรมการไหลของสตาร์ชพรีเจลที่เตรียมจากสตาร์ชผสมระหว่างสตาร์ชมันสำปะหลังและ สตาร์ชข้าว (ตัวเลข 0, 10, 20,.., 100 คือปริมาณสตาร์ชข้าวในสตาร์ชผสม)