

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง

จากการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีได้แก่ ปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า และปริมาณอะมิโลส ของตัวอย่างแป้งที่ใช้ในการศึกษา 2 ชนิด คือ แป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคุ ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่าแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน และเถ้าเท่ากับร้อยละ 11.45, 0.05, 0.14 และ 0.16 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Pongsawatmanit *et al.* (2002) ที่พบว่าแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณความชื้นอยู่เท่ากับร้อยละ 12.27 โปรตีนร้อยละ 0.11 ไขมันร้อยละ 0.07 เถ้าร้อยละ 0.12 และเถ้ามีอยู่ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ เช่นเดียวกับรายงานของ Atichokudomchai *et al.* (2002) พบว่าปริมาณ โปรตีน ไขมัน และเถ้าของแป้งมันสำปะหลังมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.08, 0.19 และ 0.39 ตามลำดับ สำหรับแป้งสาคุพบว่ามีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน และเถ้า เท่ากับร้อยละ 10.95, 0.06, 0.20 และ 0.27 โดยน้ำหนักแห้งตามลำดับ ขณะที่ Ahmad *et al.* (1999) รายงานว่าแป้งสาคุมีปริมาณความชื้นระหว่างร้อยละ 10.6-20.0 โปรตีนร้อยละ 0.19-0.25 ไขมันร้อยละ 0.10-0.13 และเถ้าร้อยละ 0.06-0.43 ผลการศึกษานี้มีค่าสอดคล้องกับรายงานของ Kumkanokrat (2001) ที่พบว่าองค์ประกอบทางเคมีในแป้งสาคุมีความชื้น โปรตีน ไขมัน และเถ้า เท่ากับร้อยละ 10.95, 0.13, 0.12 และ 0.13 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ อย่างไรก็ตามทั้งแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมตามกำหนดของมาตรฐาน โดยปริมาณความชื้นในแป้งสาคุไม่เกินร้อยละ 13 โดยน้ำหนัก (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน, 2004) และองค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังมีค่าใกล้เคียงตามกำหนดของมาตรฐานคุณภาพชั้นที่ 1 ที่กำหนดให้ปริมาณความชื้นไม่เกินร้อยละ 13 โปรตีนร้อยละ 0.3 และเถ้าร้อยละ 0.15 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2521) ทั้งนี้องค์ประกอบทางเคมีของแป้งแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวิธีการสกัด กระบวนการผลิตอายุของวัตถุดิบ สภาวะแวดล้อมของการปลูกและสายพันธุ์ของวัตถุดิบ (Abera and Rakshit, 2003; Moorthy, 2002; Sriroth *et al.*, 1999)

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาकु

Compositions (% w/w, dry basis)	Cassava starch	Sago starch
Moisture content	11.45±0.04	10.95±0.18
Protein	0.05±0.001	0.06±0.001
Lipid	0.14±0.02	0.20±0.03
Ash	0.16±0.02	0.27±0.01

Note: Each value is the mean of triplicate ± SD

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลส พบว่าแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาकुมีปริมาณอะมิโลสเท่ากับร้อยละ 17.44 และ 22.86 โดยน้ำหนักแห้งตามลำดับ สำหรับปริมาณอะมิโลสในแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาकुที่มีปริมาณแป้งสาکور้อยละ 6, 12, 18 และ 24 มีค่าเท่ากับร้อยละ 17.89, 18.35, 19.80 และ 20.26 โดยน้ำหนักแห้งตามลำดับ (ตารางที่ 4.2) ซึ่งปริมาณอะมิโลสในแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาकु และแป้งผสมมีความแตกต่างกัน ( $p \leq 0.05$ ) ดังตารางภาคผนวกที่ 1 โดยพบว่าปริมาณของ อะมิโลสมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณของแป้งสาकुเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากแป้งสาकुมีปริมาณอะมิโลสเป็นองค์ประกอบสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง ผลการศึกษานี้มีความสอดคล้องกับรายงานของ Pongsawatmanit *et al.* (2002) ที่พบว่าแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณอะมิโลสโดยเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 17.0 และเช่นเดียวกันกับรายงานของ Defloor *et al.* (1998) ซึ่งกล่าวว่าปริมาณอะมิโลสในแป้งมันสำปะหลังมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 17.9-23.6 ส่วนปริมาณอะมิโลสในแป้งสาकुจากการทดลองนี้มีความสอดคล้องกับรายงานของ Piyachomkwan *et al.* (1999) ที่พบว่าแป้งสาकुมีค่าปริมาณของอะมิโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 18-21 นอกจากนี้มีรายงานของนักวิจัยท่านอื่นๆ ว่าพบปริมาณของอะมิโลสในแป้งสาकुที่แตกต่างออกไป เช่นมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 22-31 (Ahmad *et al.*, 1999) และร้อยละ 27.2 (Cui and Oates, 1997) ทั้งนี้ความแตกต่างที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลจากความแตกต่างของสภาพการเพาะปลูก ฤดูกาล หรือแหล่งของการเพาะปลูก การเก็บเกี่ยววัตถุดิบ และส่วนของลำต้นที่นำมาใช้ (Ahmad *et al.*, 1999; Sriroth *et al.*, 1999; Defloor *et al.*, 1998) นอกจากนี้ปริมาณ อะมิโลสที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับวิธีการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณอะมิโลสด้วย (Mile *et al.*, 2002)

ตารางที่ 4.2 ปริมาณอะมิโลสของแป้งดิบจากแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาธู และแป้งผสมระหว่าง แป้งมันสำปะหลังและแป้งสาธูที่มีปริมาณแป้งสาธูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 6, 12, 18 และ 24

Starch type	Amylose content (%w/w, dry basis)
Sago starch	22.86±0.59 <sup>a</sup>
Cassava starch	17.44±0.51 <sup>d</sup>
Cassava-Sago starch mixture with	
6% Sago starch	17.89±0.01 <sup>cd</sup>
12% Sago starch	18.35±0.17 <sup>c</sup>
18% Sago starch	19.80±0.09 <sup>b</sup>
24% Sago starch	20.26±0.17 <sup>b</sup>

Note: Each value is the mean of duplicate ± SD.

The different superscripts in the column denote the significant differences ( $p \leq 0.05$ ).

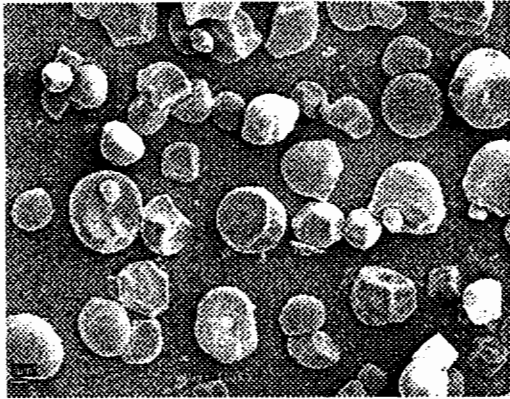
#### 4.2 สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้ง

จากการศึกษาสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาธู และแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาธู ที่กำหนดให้มีปริมาณแป้งสาธูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 6, 12, 18 และ 24 ตามลำดับ แล้วศึกษาสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้ง ได้แก่ ลักษณะรูปร่างและขนาดของเม็ดแป้ง รูปแบบโครงสร้างผลึกของแป้งและลักษณะของมอลทีสโครส กำลังการพองตัวและการละลาย ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความหนืดของแป้งเปียก และอุณหภูมิการเกิดเจลลาตินในเซชันของแป้ง ซึ่งผลการศึกษาเป็นดังนี้

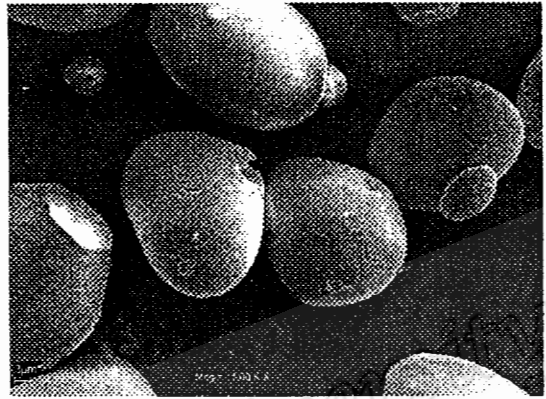
##### 4.2.1 ลักษณะรูปร่างและขนาดของเม็ดแป้ง

ผลการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาธูด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า และค่าความต่างศักย์เท่ากับ 10 kV พบว่าเม็ดแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะรูปร่างกลมและส่วนปลายด้านหนึ่งจะมีลักษณะเว้าหรือคล้ายมีรอยตัด (รูปที่ 4.1a) ส่วนเม็ดแป้งสาธูจะมีรูปร่างรีคล้ายรูปไข่และส่วนปลายอีกด้านมีลักษณะเหมือนรอยตัด (รูปที่ 4.1b) เมื่อ

ส่องด้วยกำลังขยายที่เท่ากัน (กำลังขยาย 1,000 เท่า) พบว่าเม็ดแป้งสาธูมีขนาดใหญ่กว่าเม็ดแป้งมันสำปะหลัง



(a) Cassava starch

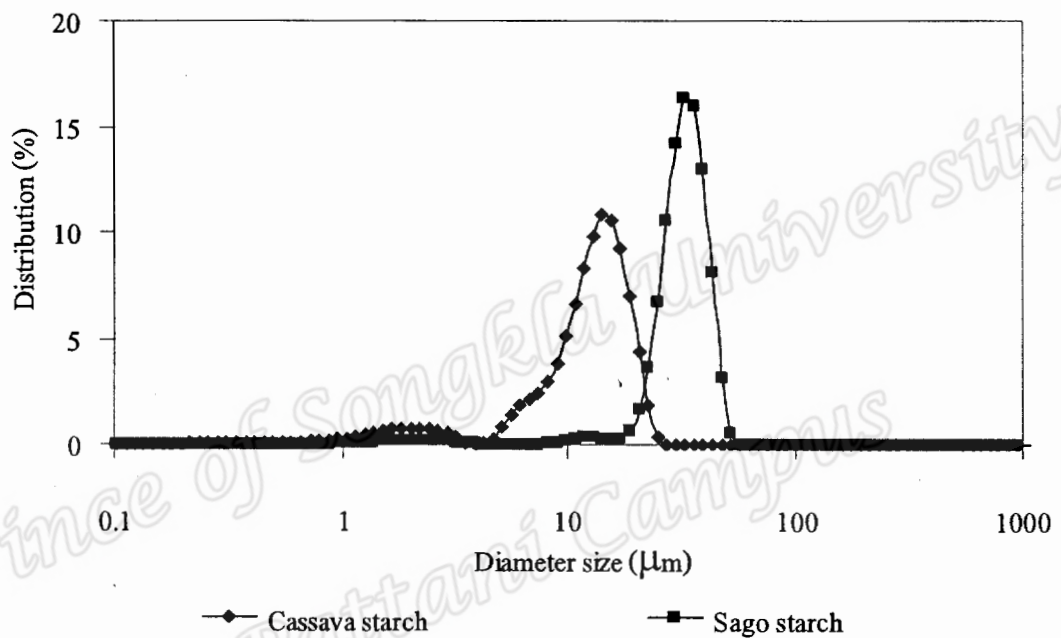


(b) Sago starch

รูปที่ 4.1 ลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งดิบของแป้งมันสำปะหลัง (a) และแป้งสาธู (b) เมื่อส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

จากการวิเคราะห์การกระจายและขนาดของเม็ดแป้ง (รูปที่ 4.2) พบว่าเม็ดแป้งมันสำปะหลังมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงระหว่าง 0.044-27.39 ไมครอน โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 12.93 ไมครอน ซึ่งแป้งมันสำปะหลังมีการกระจายของขนาดอนุภาคเม็ดแป้งช่วง 1-10 ไมครอน เท่ากับร้อยละ 24.64 และช่วง 10-27.39 ไมครอน เท่ากับร้อยละ 73.30 ส่วนแป้งสาธูอนุภาคมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.040-63.41 ไมครอน และขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 33.84 ไมครอน ซึ่งผลวิเคราะห์การกระจายของขนาดอนุภาคเม็ดแป้งสาธู พบว่าแป้งสาธูที่มีการกระจายของขนาดอนุภาคช่วง 1-10 ไมครอน มีอยู่เพียงร้อยละ 2.52 ในขณะที่เม็ดแป้งสาธูส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 96.87 มีการกระจายของขนาดในช่วงระหว่าง 10-63.41 ไมครอน (ตารางที่ 4.3) ซึ่งกล่าวได้ว่าแป้งสาธูมีขนาดของเม็ดแป้งใหญ่กว่าแป้งมันสำปะหลังประมาณ 2 เท่า ซึ่งผลการศึกษานี้มีความสอดคล้องกับรายงานของ Piyachomkwan *et al.* (1999) ที่พบว่าเม็ดแป้งสาธูมีขนาดอนุภาคระหว่าง 3-60 ไมครอน และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 17-36 ไมครอน ขณะที่ Siroth *et al.* (1999) พบว่าเม็ดแป้งมันสำปะหลังมีขนาดระหว่าง 8-22 ไมครอน และมีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 15 ไมครอน Mishra and Rai (2006) รายงานว่าแป้งมันสำปะหลังมีรูปร่างกลมและมีรอยตัด โดยมีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 7.1-25 ไมครอน ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 15 ไมครอน นอกจากนี้ Pomeranz (1991)

รายงานว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของแป้งสาธู (25 ไมครอน) ใหญ่กว่าแป้งข้าวเจ้า (5 ไมครอน) แป้งข้าวสาลี (15 ไมครอน) แป้งข้าวโพด (15 ไมครอน) แป้งข้าวบาร์เลย์ (15 ไมครอน) และแป้งมันสำปะหลัง (20 ไมครอน) ตามลำดับ แป้งสาธูมีขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งโดยเฉลี่ยใหญ่กว่าแป้งจากธัญพืช (เช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวสาลี แป้งข้าวโพด แป้งข้าวบาร์เลย์) และแป้งจากพืชหัว (แป้งมันสำปะหลัง) แต่มีขนาดเล็กกว่าแป้งมันฝรั่งที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 38.3 ไมครอน (Li and Yeh, 2001)



รูปที่ 4.2 การกระจายขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งดิบจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาธู

**ตารางที่ 4.3** การกระจายขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งดิบจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคุ

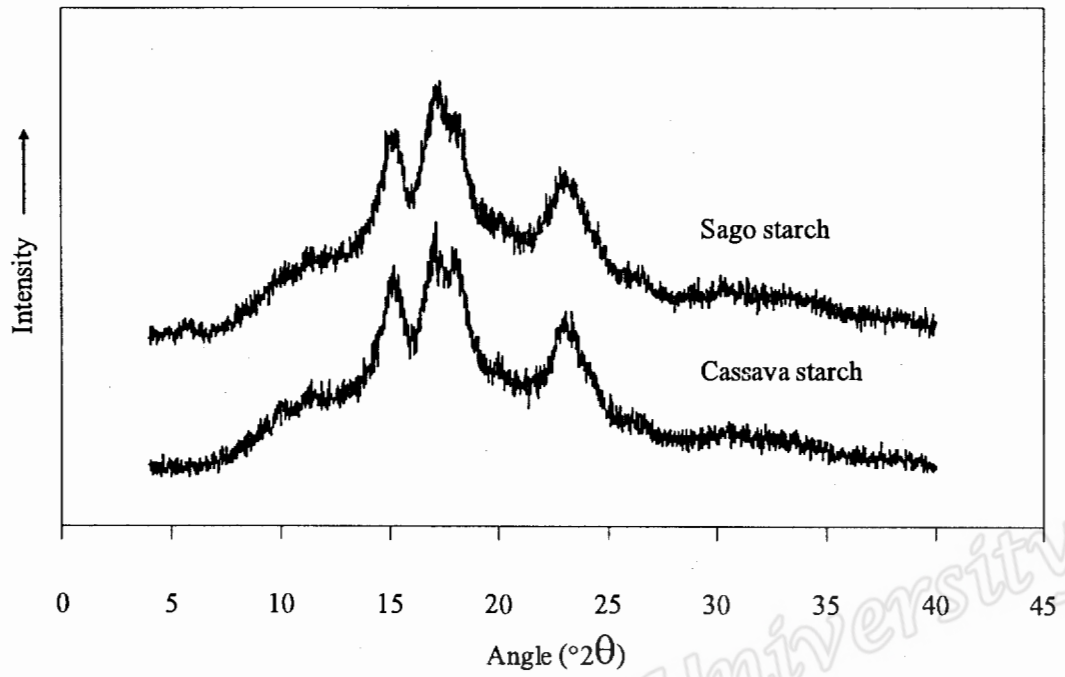
Starch type	Ranges of granule size ( $\mu\text{m}$ )	Granule size in average ( $\mu\text{m}$ )	Distribution of starch granule (%)		
			<1 $\mu\text{m}$	1-<10 $\mu\text{m}$	>10 $\mu\text{m}$
Sago starch	0.040-63.41	33.84 $\pm$ 9.349	0.61	2.52	96.87
Cassava starch	0.044-27.39	12.93 $\pm$ 5.591	2.06	24.64	73.30

Note: Each value is the mean of triplicate  $\pm$  SD.

**4.2.2 รูปแบบโครงสร้างผลึกและลักษณะมอลติสโครอสของแป้งดิบ**

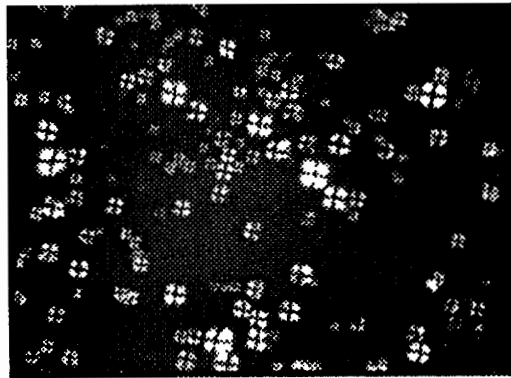
จากผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งโดยใช้เทคนิคการหักเหของรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่อง XRD พบว่าแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคุ มีรูปแบบของโครงสร้างผลึกเป็นแบบ A ดังนั้นแป้งผสมระหว่างแป้งทั้ง 2 ชนิด ดังกล่าวย่อมมีโครงสร้างผลึกแบบ A ด้วยเช่นกัน โดยลักษณะที่ปรากฏคือมีที่ตำแหน่ง 15, 17, 18 และ 23 $^{\circ}$ 2 $\theta$  (รูปที่ 4.3) เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Sriburi (1999) และรายงานของ Atichokudomchai *et al.* (2002) ขณะที่รายงานของ Ahmad *et al.* (1999) พบว่าแป้งสาคุมีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ C ซึ่งเป็นลักษณะของโครงสร้างผลึกที่ผสมระหว่างผลึกแบบ A และ B มีความแตกต่างจากลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A คือจะพบว่ามีพีคอีกตำแหน่งที่ 5.6 $^{\circ}$ 2 $\theta$

นอกจากการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD แล้วยังสามารถตรวจสอบความเป็นผลึกของแป้งดิบได้โดยการตรวจการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ซึ่งจะเห็นมอลติสโครอส หรือลักษณะคล้ายกากบาท (Whistler and Bemiller, 1999) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งลักษณะดังกล่าวของแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคุมีความแตกต่างกัน และสามารถแยกแยะได้อย่างชัดเจนเนื่องจากเม็ดแป้งมันสำปะหลังมีขนาดเล็กกว่าเม็ดแป้งสาคุ

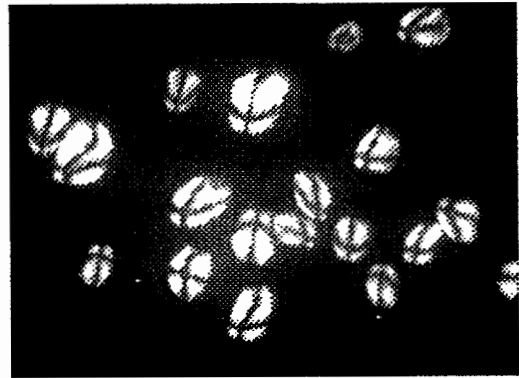


รูปที่ 4.3 รูปแบบโครงสร้างผลึกของแป้งดิบจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาธุ

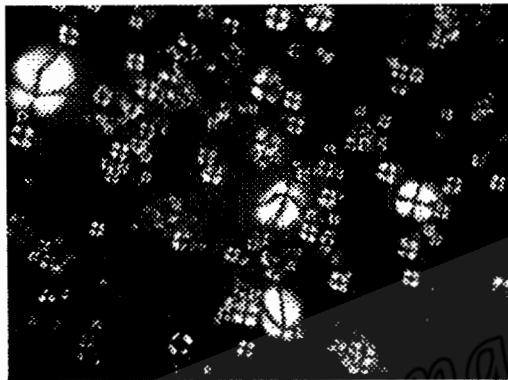
Prince of Songkhla University  
Pattani Campus



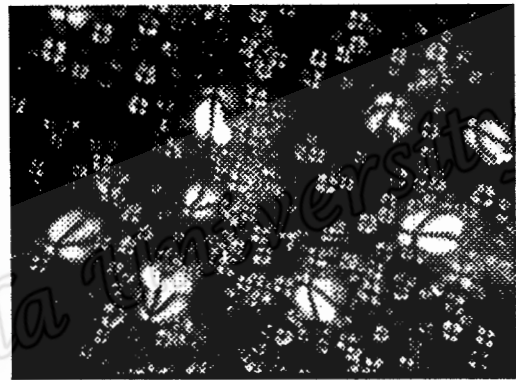
(a) Cassava starch



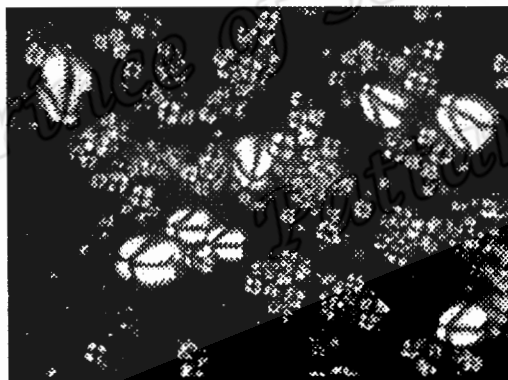
(b) Sago starch



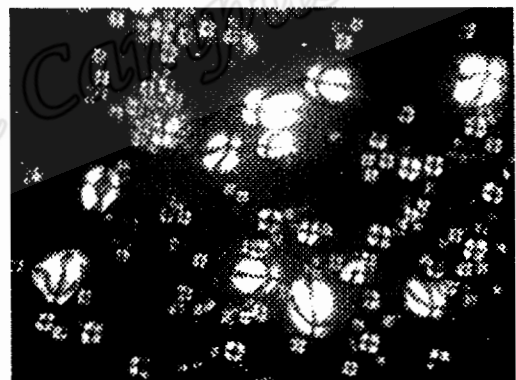
(c) 6% Sago starch



(d) 12% Sago starch



(e) 18% Sago starch



(f) 24% Sago starch

รูปที่ 4.4 ลักษณะมอดติสโครของแป้งดิบจากแป้งมันสำปะหลัง (a) แป้งสาตุ (b) และแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาตุที่มีปริมาณแป้งสาตุเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 6 (c), 12 (d), 18 (e) และ 24 (f) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์โพลาไรซ์ที่กำลังขยาย 400 เท่า



#### 4.2.3 กำลั้งการพองตัวและการละลาย

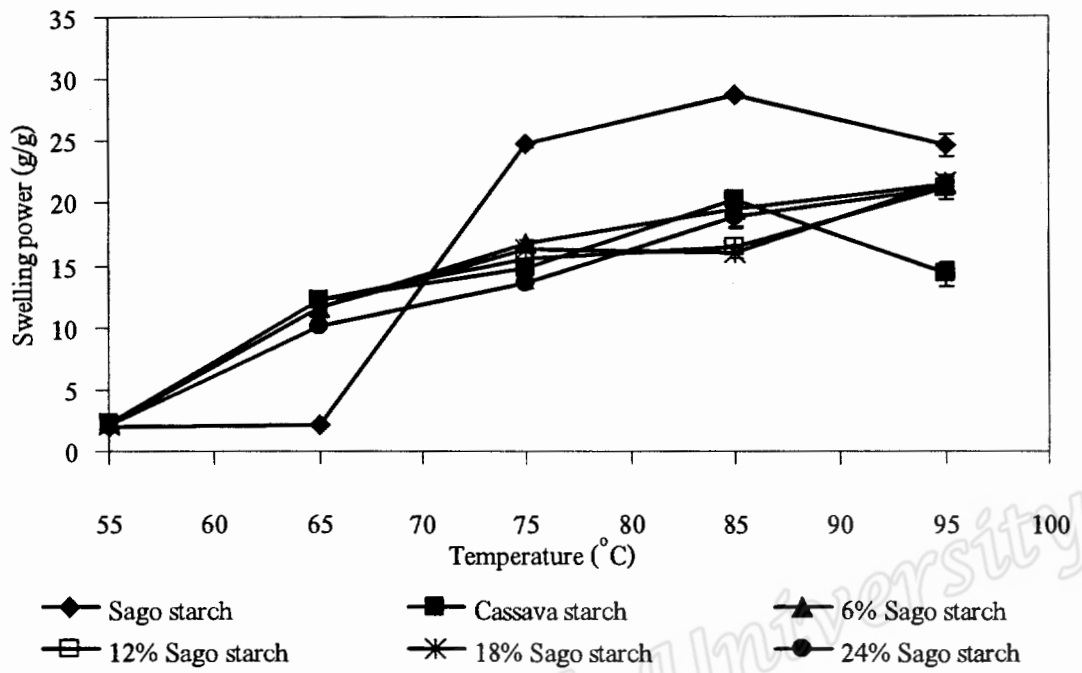
จากการวิเคราะห์กำลั้งการพองตัวและการละลายของแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาकु และแป้งผสมที่มีปริมาณแป้งทั้งสองชนิดในสัดส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 55, 65, 75, 85 และ 95°C โดยกำลั้งการพองตัวของแป้งจะแสดงเป็นน้ำหนักของเม็ดแป้งที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเม็ดแป้งพองตัวได้สูงสุดต่อน้ำหนักของตัวอย่าง สำหรับความสามารถในการละลายจะแสดงเป็นน้ำหนักของแป้งทั้งหมดในสารละลายที่สามารถละลายได้ (Schoch, 1964) พบว่ากำลั้งการพองตัวของแป้งทุกชนิด การทดลองเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (รูปที่ 4.5) ซึ่งพฤติกรรมพองตัวของแป้งสาकुมีความแตกต่างจากแป้งมันสำปะหลัง กล่าวคือ ในช่วงอุณหภูมิ 55-65°C กำลั้งการพองตัวของแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและมีค่าสูงกว่าแป้งสาकुอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ดังตารางภาคผนวกที่ 2 ในขณะที่ค่ากำลั้งการพองตัวของแป้งสาकुค่อนข้างคงที่จนกระทั่งเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 65°C ขึ้นไป กำลั้งการพองตัวของแป้งสาकुเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่ามากกว่ากำลั้งการพองตัวของแป้งมันสำปะหลังเมื่ออุณหภูมิกับและสูงกว่า 75°C อย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) อย่างไรก็ตามพบว่าทั้งแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาकु มีกำลั้งการพองตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 85°C และกำลั้งการพองตัวมีค่าลดลงเมื่อจากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมากกว่า 85°C ซึ่งน่าจะเป็นเพราะเกิดการแตกของเม็ดแป้งที่พองตัวเต็มที่ มีผลให้ค่าดังกล่าวลดลง

สำหรับพฤติกรรมพองตัวของแป้งผสมทุกสัดส่วน พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกับแป้งมันสำปะหลัง อาจเนื่องจากในแป้งผสมมีสัดส่วนของแป้งมันสำปะหลังสูงกว่าแป้งสาकु โดยกำลั้งการพองตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและมีค่าสูงสุด ณ อุณหภูมิ 95°C แม้ว่าที่อุณหภูมิดังกล่าวแป้งเดี่ยวทั้งสองชนิดแสดงให้เห็นว่าอาจเกิดการแตกของเม็ดแป้งและมีผลให้ค่ากำลั้งการพองลดลง แต่สำหรับแป้งผสมแล้วค่ากำลั้งการพองตัวไม่ได้ลดลงเนื่องจากที่อุณหภูมิ 95°C ค่ากำลั้งการพองตัวของแป้งผสมมีค่าอยู่ระหว่างค่ากำลั้งการพองตัวของแป้งสาकुและของแป้งมันสำปะหลัง

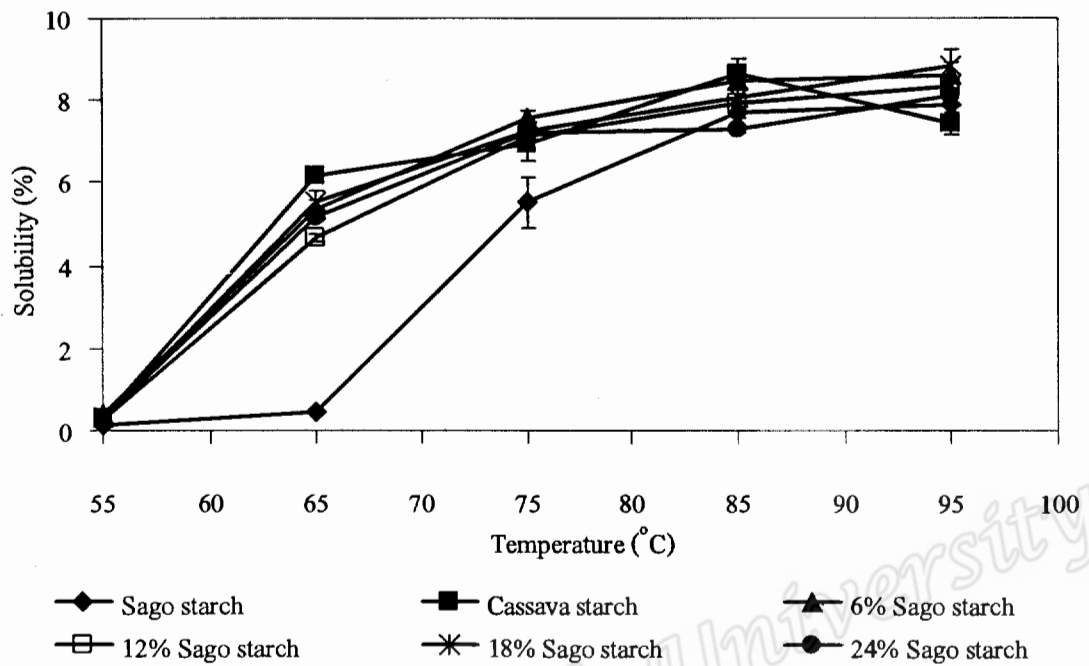
โดยทั่วไปเมื่อให้ความร้อนแก่น้ำแป้งจนมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชัน พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้าจับกับหมู่ ไฮดรอกซิลที่อิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัวขึ้น และโมเลกุลบางส่วนของจะละลายออกมา (Hoover, 2001; Singh *et al.*, 2003) ทั้งนี้การพองตัวของแป้งแต่ละชนิดที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของโมเลกุลภายในโครงสร้างของเม็ดแป้ง (Pomeranz, 1991) จากผลการศึกษาจะเห็นว่า การพองตัวของแป้งมันสำปะหลังเริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าแป้งสาकु อาจบ่งชี้ให้เห็นว่าความแข็งแรงของโครงสร้างเม็ดแป้งมันสำปะหลังอ่อนกว่าเม็ดแป้งสาकु จึงทำให้แป้งมันสำปะหลังมีความสามารถในการดูดซับน้ำ และเกิดการพองตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าแป้งสาकु ขณะที่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ 65°C แป้งสาकु

เริ่มมีการฟองตัวและการละลายเกิดขึ้นอย่างชัดเจน และในช่วงอุณหภูมิ 75-95<sup>o</sup>ซ พบว่าแป้งสาคุมีค่ากำลังการฟองตัวสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง ทั้งนี้เมื่อพิจารณากำลังการฟองตัวสูงสุดที่อุณหภูมิเดียวกันในช่วงดังกล่าว อาจเป็นผลเนื่องจากขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยของเม็ดแป้งสาคุ (33.84 ไมครอน) ใหญ่กว่าแป้งมันสำปะหลัง (12.93 ไมครอน) เมื่อภายหลังได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น พันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย ขนาดเม็ดแป้งที่ใหญ่กว่าทำให้มีหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระจำนวนมาก ส่งผลให้เม็ดแป้งมีความสามารถจับกับโมเลกุลของน้ำไว้ภายในโครงสร้างอนุภาคของเม็ดแป้งได้มากกว่า ทำให้น้ำหนักของเม็ดแป้งที่ฟองตัวเพิ่มขึ้นมีค่ามาก ส่งผลให้แป้งสาคุมีกำลังการฟองตัวสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง (Wattanachant *et al.*, 2002) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Piyachomkwan *et al.* (1999) และรายงานของ Sriroth *et al.* (1999) ที่พบว่ากำลังการฟองของแป้งสาคุมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อให้ความร้อนสูงกว่า 60<sup>o</sup>ซ และจากรายงานของ Srichuwong *et al.* (2005) พบว่ากำลังการฟองตัวของแป้งมันสำปะหลังเริ่มเกิดขึ้นชัดเจนที่อุณหภูมิ 60<sup>o</sup>ซ และกำลังการฟองตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 70<sup>o</sup>ซ ในขณะที่แป้งสาคุกำลังการฟองตัวเริ่มเกิดขึ้นชัดเจนที่อุณหภูมิสูงกว่า 60<sup>o</sup>ซ และกำลังการฟองตัวมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 80<sup>o</sup>ซ

ความสามารถในการละลายของแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาคุ และแป้งผสมที่อุณหภูมิต่างๆ (รูปที่ 4.6) พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในทุกชุดการทดลอง (ตารางภาคผนวกที่ 3) โดยช่วงอุณหภูมิ 55-65<sup>o</sup>ซ ความสามารถในการละลายของแป้งมันสำปะหลังและแป้งผสมมีค่ามากกว่าแป้งสาคุอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ดังตารางภาคผนวกที่ 3 ขณะที่การละลายของแป้งสาคุมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่เมื่อให้ความร้อนสูงขึ้นกว่า 65<sup>o</sup>ซ แป้งสาคุมีค่าความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่าความสามารถในการละลายของแป้งมันสำปะหลังและแป้งผสม มีค่าสูงกว่าการละลายของแป้งสาคุเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (55-95<sup>o</sup>ซ) สำหรับการละลายของแป้งผสมที่ปริมาณของแป้งสาคุแตกต่างกัน พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกับแป้งมันสำปะหลัง ทั้งนี้อาจเนื่องจากความแข็งแรงของโครงสร้างเม็ดแป้งและโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังต่ำกว่าแป้งสาคุ สังเกตได้จากเม็ดแป้งมันสำปะหลังเกิดการฟองตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าแป้งสาคุ



รูปที่ 4.5 กำลังการพองตัวของแป้งดิบจากแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาकु และแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาकुที่มีปริมาณแป้งสาकुเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 6, 12, 18 และ 24 ที่อุณหภูมิ 55-95°C



รูปที่ 4.6 การละลายของแป้งดิบจากแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาคุ และแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคุที่มีปริมาณแป้งสาคุเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 6, 12, 18 และ 24 ที่อุณหภูมิ 55-95°C

#### 4.2.4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งผสม

จากการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาคุ และแป้งผสมโดยใช้เครื่อง RVA ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยเมื่อแป้งได้รับความร้อนจนเกิดเจลาตินในเซชันเม็ดแป้งสามารถดูดซับน้ำและเกิดการพองตัว ซึ่งการพองตัวของเม็ดแป้งมีผลให้เกิดความหนืดเพิ่มขึ้น (Zobel and Stephen, 1995) จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงของความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาคุ และแป้งผสม (ตารางที่ 4.4) มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ดังตารางภาคผนวกที่ 4 โดยแป้งมันสำปะหลังความหนืดจะเริ่มปรากฏขึ้นที่อุณหภูมิ 72.0°C ขณะที่แป้งสาคุเริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่าคือ 77.2°C ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่กล่าวถึงการพองตัวที่พบว่าแป้งมันสำปะหลังเริ่มพองตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าแป้งสาคุ จากรายงานของ Piyachomkwan *et al.* (1999) พบว่าอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งสาคุอยู่ในช่วง 76-77°C ขณะที่ Ahmad *et al.* (1999) รายงานไว้ที่ 72.5-74.0°C

จากการศึกษาของ Srichuwong *et al.* (2005) พบว่าอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดของ แป้งมันสำปะหลังต่ำกว่าแป้งสาคู สำหรับแป้งผสมที่ปริมาณของแป้งสาคูแตกต่างกันมีค่าอุณหภูมิที่ เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดในช่วง 72.43-72.98<sup>o</sup>ซ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับแป้งมันสำปะหลัง มากกว่าแป้งสาคู ซึ่งอาจเป็นผลจากสัดส่วนของแป้งผสมประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลังเป็นส่วน ใหญ่ ส่งผลให้อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งผสมมีค่าใกล้เคียงกับแป้งมัน สำปะหลัง

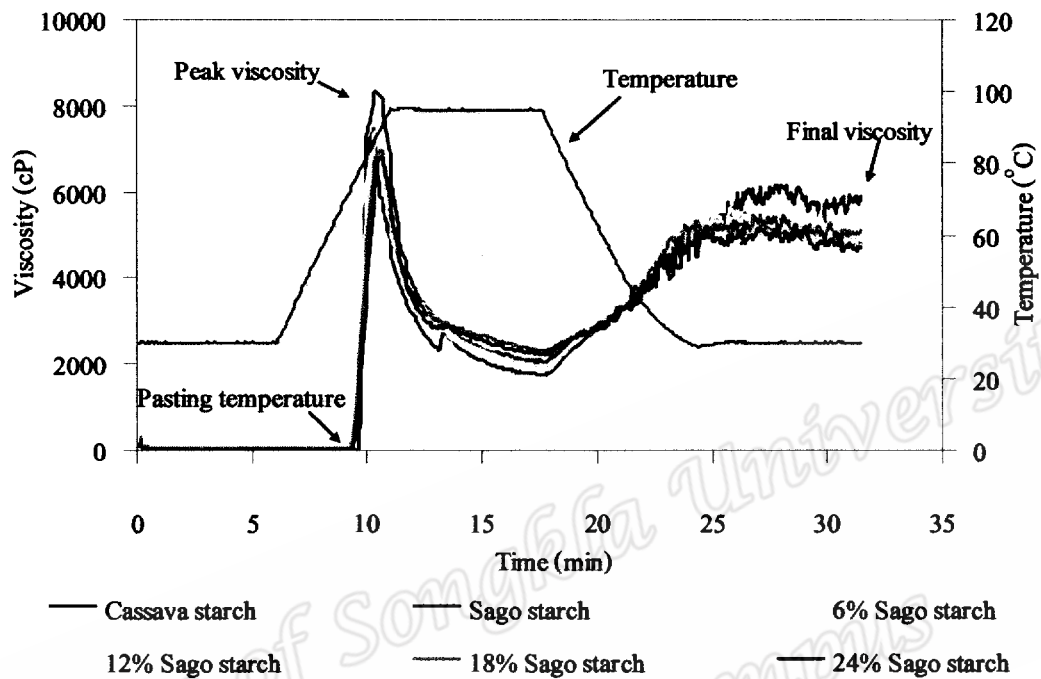
ค่าความหนืดสูงสุดซึ่งบ่งบอกถึงการพองตัวสูงสุดของเม็ดแป้ง พบว่าของแป้งมัน สำปะหลัง แป้งสาคู และแป้งผสมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ดังตารางภาคผนวก ที่ 4 โดยความหนืดสูงสุดของแป้งสาคู (8374.50 เซนติพอยซ์) มีค่าสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง (7433.00 เซนติพอยซ์) และแป้งผสม (6734.50-7312.00 เซนติพอยซ์) และเมื่อพิจารณาค่าความ เสถียรของเม็ดแป้งที่เกิดการพองตัวแล้ว (Breakdown) หลังการเกิดเจลลิตินในเซชัน จะพบว่าแป้ง สาคูมีค่าความเสถียรต่อแรงกวน (6242.50 เซนติพอยซ์) สูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง (5630.00 เซนติ พอยซ์) และแป้งผสม (4559.00-5448.50 เซนติพอยซ์) จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาความหนืด สูงสุดของแป้งผสมมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของแป้งสาคูเพิ่มขึ้น ทั้งที่ความหนืดสูงสุดของแป้งสาคูมี ค่าสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง ทั้งนี้กรณีความหนืดสูงสุดของแป้งสาคูเพียงอย่างเดียวมีสัดส่วนของ ปริมาณแป้งสาคูมากกว่าในของแป้งผสม และการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งผสมมีลักษณะ ใกล้เคียงกับแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งอาจเป็นเพราะในแป้งผสมมีสัดส่วนของแป้งมันสำปะหลังเป็น ส่วนใหญ่ การเพิ่มปริมาณของแป้งสาคูจึงทำให้สัดส่วนของแป้งมันสำปะหลังน้อยลงและมีผลให้ ปริมาณอะมิโลส ของแป้งผสมเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้ความหนืดสูงสุดของแป้งผสมมีค่าลดลง โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงความหนืดในแป้งผสมที่มีความแตกต่างจากแป้งเดี่ยว อาจเนื่องจากการ มีขนาดของเม็ดแป้งที่แตกต่างกันอยู่ร่วมกันทำให้ความสามารถในการดูดซับและการพองตัวของ เม็ดแป้งมีความแตกต่างกัน โดยเมื่อพิจารณากำลั้งการพองตัวหรืออุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มปรากฏ ของแป้งมันสำปะหลังเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าแป้งสาคู ดังนั้นในกรณีที่ผสมแป้งเข้าด้วยกัน เม็ด แป้งมันสำปะหลังจึงสามารถดูดซับน้ำและเกิดการพองตัว ทำให้ความหนืดเกิดขึ้นก่อนแป้งสาคู ขณะที่ในแป้งสาคู การพองตัวและความหนืดเริ่มปรากฏที่อุณหภูมิสูงกว่า ดังแสดงในตารางที่ 5

ความหนืดสุดท้าย ซึ่งเป็นความหนืดในช่วงการลดอุณหภูมิจาก 95 เป็น 30<sup>o</sup>ซ และ คงที่ที่อุณหภูมินี้ พบว่าความหนืดสุดท้ายของแป้งสาคูและแป้งมันสำปะหลังมีค่าเท่ากับ 5842.50 และ 4816.50 เซนติพอยซ์ ส่วนแป้งผสมพบว่ามีความหนืดสุดท้ายใกล้เคียงกับแป้งมันสำปะหลัง คือมีค่าระหว่าง 4701.50-5108.50 เซนติพอยซ์ สำหรับค่าการคืนตัว (Set back) ซึ่งเป็นความหนืดที่ เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์เกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งเช่นกัน พบว่าแป้งสาคูมีค่าการคืนตัวสูงกว่า

แป้งมันสำปะหลัง ซึ่งอะมิโลสเป็นองค์ประกอบที่มีผลต่อค่าการคืนตัวของแป้ง (Wang *et al.*, 2002) กล่าวคือเนื่องจากแป้งที่ผ่านการเกิดเจลลาคีในเซชันแล้วภายหลังเมื่อลดอุณหภูมิของแป้งเปียกลง ส่งผลให้โมเลกุลอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจับเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล ทำให้เกิดโครงข่ายที่แข็งแรงของเจลและมีผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ในการศึกษาครั้งนี้ตัวอย่างแป้งสาครมีปริมาณอะมิโลสสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง จึงทำให้ความหนืดสุดท้ายสูงกว่า ค่าการคืนตัวหรือการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งสาครจึงมีค่ามากกว่าแป้งมันสำปะหลัง

จากผลการทดลองจะเห็นว่าในทุกค่าของลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งสาครมีค่าสูงกว่าแป้งมันสำปะหลังและแป้งผสมในทุกสัดส่วนและพบว่าแป้งสาครมีอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงของความหนืดสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงการพองตัว เนื่องจากด้วยเหตุข้างต้นที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ขนาดของเม็ดแป้งสาครที่ใหญ่กว่า ทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำและการพองตัวของเม็ดแป้งสาครสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง ส่งผลให้ความหนืดมีค่าสูงกว่า ซึ่งผลการวิเคราะห์ความหนืดด้วยเครื่อง RVA มีความสอดคล้องการผลการวิเคราะห์กำลังการพองตัวของแป้งที่พบว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 75<sup>o</sup>ซ กำลังการพองตัวของแป้งสาครมีค่าสูงกว่าแป้งมันสำปะหลังและแป้งผสม เช่นเดียวกับรายงานของ Wattanachant *et al.* (2002) กล่าวว่าแป้งสาครซึ่งมีอะมิโลสสูงเท่ากับร้อยละ 27 ให้ค่ากำลังการพองตัวมากกว่าเมื่อเทียบกับแป้งที่มีอะมิโลสดำกว่าอย่างเช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพคเหนียว และแป้งข้าวบาร์เลย์เหนียว ซึ่งมีอะมิโลสเป็นองค์ประกอบเท่ากับร้อยละ 17, 17, 1 และ 5 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเม็ดแป้งสาครมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของการเกิด เจลลาคีในเซชัน พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้าจับกับหมู่ ไฮดรอกซิลที่อิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัว และโมเลกุลบางส่วนของจะละลายออกมา ทำให้เกิดความหนืดขึ้น ซึ่งแป้งสาครมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ ทำให้มีหมู่ไฮดรอกซิลที่อิสระเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำสามารถเข้าจับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระได้มากกว่าแป้งที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นเม็ดแป้งสาครมีปริมาตรของการขยายตัวหรือสามารถพองตัวได้มากกว่าจึงส่งผลให้ความหนืดสูงสุดของแป้งสาครมีค่าสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง เช่นเดียวกับรายงานของ Srichuwong *et al.* (2005) กล่าวว่าการเปลี่ยนแปลงของความหนืดมีความสัมพันธ์กับการพองตัวของเม็ดแป้ง ซึ่งการพองตัวของเม็ดแป้งเป็นผลจากการสูญเสีย โครงสร้างผลึกของอะมิโลเพคติน กล่าวคือ แป้งที่มีขนาดกิ่งสาขาในอะมิโลเพคตินยาวจะส่งเสริมให้โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งมีความแข็งแรง เม็ดแป้งจึงเกิดการพองตัวได้ช้า เป็นผลให้อุณหภูมิที่เริ่มการเปลี่ยนแปลงของความหนืดมีค่าสูง ในขณะที่แป้งที่มีขนาดกิ่งสาขาในอะมิโลเพคตินสั้นเม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวและแตกตัวได้ง่ายส่งผลให้การเปลี่ยนแปลง

ของความหนืดเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า และปริมาณอะมิโลสที่สูงในแป้งจะมีผลให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวและเกิดความหนืดได้อย่างจำกัด



รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งดิบจากแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาธู และแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาธูที่มีปริมาณแป้งสาธูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 6, 12, 18 และ 24

ตารางที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งดิบจากแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาคู และแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 6, 12, 18 และ 24

Starch type	Peak viscosity (cP)	Trough viscosity (cP)	Breakdown (cP)	Final viscosity (cP)	Setback (cP)	Pasting temperature (°C)
Sago starch	8374.50±30.41 <sup>a</sup>	2132.00±124.45 <sup>b</sup>	6242.50±94.04 <sup>a</sup>	5842.50±68.59 <sup>a</sup>	3710.50±193.04 <sup>a</sup>	77.20±0.49 <sup>a</sup>
Cassava starch	7433.00±19.80 <sup>b</sup>	1803.00±82.02 <sup>c</sup>	5630.00±101.82 <sup>b</sup>	4816.50±33.23 <sup>c</sup>	3013.50±48.79 <sup>b</sup>	72.00±0.49 <sup>b</sup>
Cassava-Sago starch mixture with						
6% Sago starch	7312.00±90.51 <sup>b</sup>	1863.50±2.12 <sup>c</sup>	5448.50±92.63 <sup>c</sup>	4830.50±109.60 <sup>c</sup>	2967.00±107.48 <sup>b</sup>	72.88±0.39 <sup>b</sup>
12% Sago starch	7079.50±40.31 <sup>c</sup>	1898.50±53.03 <sup>c</sup>	5181.00±12.73 <sup>d</sup>	4761.00±96.17 <sup>c</sup>	2862.50±149.20 <sup>b</sup>	72.43±0.18 <sup>b</sup>
18% Sago starch	6954.00±5.66 <sup>c</sup>	2336.00±33.94 <sup>a</sup>	4681.00±39.60 <sup>c</sup>	5108.50±24.75 <sup>b</sup>	2772.50±58.69 <sup>bc</sup>	72.48±0.04 <sup>b</sup>
24% Sago starch	6734.50±86.97 <sup>d</sup>	2175.50±57.28 <sup>ab</sup>	4559.00±29.70 <sup>c</sup>	4701.50±0.71 <sup>c</sup>	2526.00±56.57 <sup>c</sup>	72.98±0.67 <sup>b</sup>

Note: Each value is the mean of duplicate ± SD.

The different superscripts in the column denote the significant differences ( $p \leq 0.05$ ).



#### 4.2.5 อุณหภูมิการเกิดเจลลาตินในเซชัน

จากผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการเกิดเจลลาตินในเซชันของแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาकु และแป้งผสมที่ปริมาณของแป้งสาकुร้อยละ 6, 12, 18 และ 24 ด้วยเครื่อง DSC (ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.8) พบว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลาตินในเซชันของแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาकु และแป้งผสมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ดังตารางภาคผนวกที่ 5 กล่าวคือแป้งสาकुมีอุณหภูมิการเกิดเจลลาตินในเซชันสูงกว่าแป้งมันสำปะหลังและแป้งผสม โดยแป้งสาकुมีค่า  $T_o$ ,  $T_p$  และ  $T_c$  เท่ากับ 66.85, 74.08 และ 79.10 $^{\circ}$ C ตามลำดับ ในขณะที่แป้งมันสำปะหลังมีค่าเท่ากับ 62.67, 68.50 และ 76.15 $^{\circ}$ C ตามลำดับ กรณีของแป้งผสม พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลาตินในเซชันของแป้งผสมที่ปริมาณของแป้งสาकुต่างกัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ ) ดังตารางภาคผนวกที่ 5 คือมีค่าอยู่ในช่วง 62.76-62.89 $^{\circ}$ C และมีค่าใกล้เคียงอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลาตินในเซชันของแป้งมันสำปะหลัง ส่วนอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิต่ำสุดของการเกิดเจลลาตินในเซชันของแป้งผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของแป้งสาकुเพิ่มขึ้น ซึ่งอุณหภูมิสูงสุดของการเกิดเจลลาตินในเซชันมีค่าอยู่ในช่วง 68.67-68.83 $^{\circ}$ C และอุณหภูมิต่ำสุดของการเกิดเจลลาตินในเซชันจะมีค่าอยู่ในช่วง 76.24-78.55 $^{\circ}$ C และจากเทอร์โมแกรมที่ได้ (รูปที่ 12) จะเห็นว่ามีพีคปรากฏเพียงพีคเดียว โดยลักษณะพีคของแป้งผสมจะกว้างกว่าพีคของแป้งมันสำปะหลังและกว้างขึ้นเมื่อสัดส่วนของแป้งสาकुเพิ่มขึ้น นั่นคือช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลาตินในเซชัน ( $T_o$ - $T_c$ ,  $\Delta T$ ) ของแป้งผสมจะกว้างกว่าแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาकु และเมื่อปริมาณแป้งสาकुในแป้งผสมเพิ่มขึ้น ค่า  $\Delta T$  ก็เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ดังตารางภาคผนวกที่ 5 โดยมีค่าเท่ากับ 12.26, 13.48, 13.36, 14.80, 15.49 และ 15.79 $^{\circ}$ C ตามลำดับ

ค่าพลังงานเอนทัลปี ( $\Delta H$ ) แสดงถึงพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะระหว่างโมเลกุลภายในโครงสร้างของเม็ดแป้งในระหว่างการเกิดเจลลาตินในเซชันของแป้ง (Cooke and Gidley, 1992) พบว่า ค่า  $\Delta H$  ของแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาकु และแป้งผสมมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ ) คือมีค่าอยู่ในช่วง 13.53-15.08 จูลต่อกรัม

ผลจากการศึกษานี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Piyachomkwan *et al.* (1999) ที่พบว่าแป้งสาकुมีค่า  $T_o$ ,  $T_p$  และ  $T_c$  ของการเกิดเจลลาตินในเซชันอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 63.50-68.34, 71.98-73.40 และ 82.08-84.97 $^{\circ}$ C ตามลำดับ และค่า พลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาตินในเซชันมีค่าเท่ากับ 16.25-19.55 จูลต่อกรัม ขณะที่ Ahmad *et al.* (1999) พบว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลาตินในเซชันของแป้งสาकुที่ศึกษามีค่าอยู่ในช่วง 69.4-70.1 $^{\circ}$ C และจากรายงานของ Cui and Oates (1996) ก็

พบว่าแป้งสาขามีค่า  $T_o$ ,  $T_p$  และ  $T_c$  เท่ากับ 67.2, 74.0 และ 88.2 $^{\circ}$ C ตามลำดับ และค่า  $\Delta H$  เท่ากับ 15.6 จูลต่อกรัม

กรณีของแป้งมันสำปะหลัง ผลการศึกษาที่ความสอดคล้องกับรายงานของ Li และ Yeh (2001) ที่พบว่าแป้งมันสำปะหลังมีค่า  $T_o$  และ  $T_p$  เท่ากับ 64.5 $^{\circ}$ C และ 71.0 $^{\circ}$ C และมีค่า  $\Delta H$  เท่ากับ 13.0 จูลต่อกรัม นอกจากนี้รายงานของ Gunaratne and Hoover (2002) ยังพบว่า  $T_o$ ,  $T_p$  และ  $T_c$  ของการเกิดเจลลาติโนเซชันของแป้งมันสำปะหลังมีค่าเท่ากับ 63.0 71.5 และ 81.5 $^{\circ}$ C ตามลำดับ และค่า  $\Delta H$  เท่ากับ 12.3 จูลต่อกรัม

**ตารางที่ 4.5** อุณหภูมิการเกิดเจลลาติโนเซชันของแป้งดิบจากแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาข และแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาขที่มีปริมาณแป้งสาขเป็นส่วนผสมเท่ากับ ร้อยละ 6, 12, 18 และ 24

Starch type	$T_o$ ( $^{\circ}$ C)	$T_p$ ( $^{\circ}$ C)	$T_c$ ( $^{\circ}$ C)	$\Delta T$ ( $^{\circ}$ C)	$\Delta H$ (J/g)
Sago starch	66.85 $\pm$ 0.22 <sup>a</sup>	74.08 $\pm$ 0.12 <sup>a</sup>	79.10 $\pm$ 0.47 <sup>a</sup>	12.26 $\pm$ 0.24 <sup>d</sup>	14.93 $\pm$ 1.00 <sup>a</sup>
Cassava starch	62.67 $\pm$ 0.13 <sup>b</sup>	68.50 $\pm$ 0.00 <sup>c</sup>	76.15 $\pm$ 0.03 <sup>c</sup>	13.48 $\pm$ 0.15 <sup>c</sup>	14.60 $\pm$ 0.67 <sup>a</sup>
Cassava-Sago starch mixture with					
6% Sago starch	62.89 $\pm$ 0.22 <sup>b</sup>	68.75 $\pm$ 0.12 <sup>bc</sup>	76.24 $\pm$ 0.67 <sup>c</sup>	13.36 $\pm$ 0.45 <sup>c</sup>	15.08 $\pm$ 0.71 <sup>a</sup>
12% Sago starch	62.77 $\pm$ 0.09 <sup>b</sup>	68.75 $\pm$ 0.12 <sup>bc</sup>	77.57 $\pm$ 0.24 <sup>b</sup>	14.80 $\pm$ 0.14 <sup>b</sup>	14.86 $\pm$ 0.39 <sup>a</sup>
18% Sago starch	62.85 $\pm$ 0.22 <sup>b</sup>	68.67 $\pm$ 0.00 <sup>bc</sup>	78.34 $\pm$ 0.18 <sup>ab</sup>	15.49 $\pm$ 0.04 <sup>ab</sup>	13.53 $\pm$ 1.33 <sup>a</sup>
24% Sago starch	62.76 $\pm$ 0.09 <sup>b</sup>	68.83 $\pm$ 0.24 <sup>b</sup>	78.55 $\pm$ 0.35 <sup>a</sup>	15.79 $\pm$ 0.44 <sup>a</sup>	14.24 $\pm$ 0.11 <sup>a</sup>

Note:  $T_o$  = Onset temperature;  $T_p$  = Peak temperature;  $T_c$  = Conclusion temperature;

$\Delta T = T_o - T_c$ ;  $\Delta H$  = Enthalpy (J/g of dry wt.)

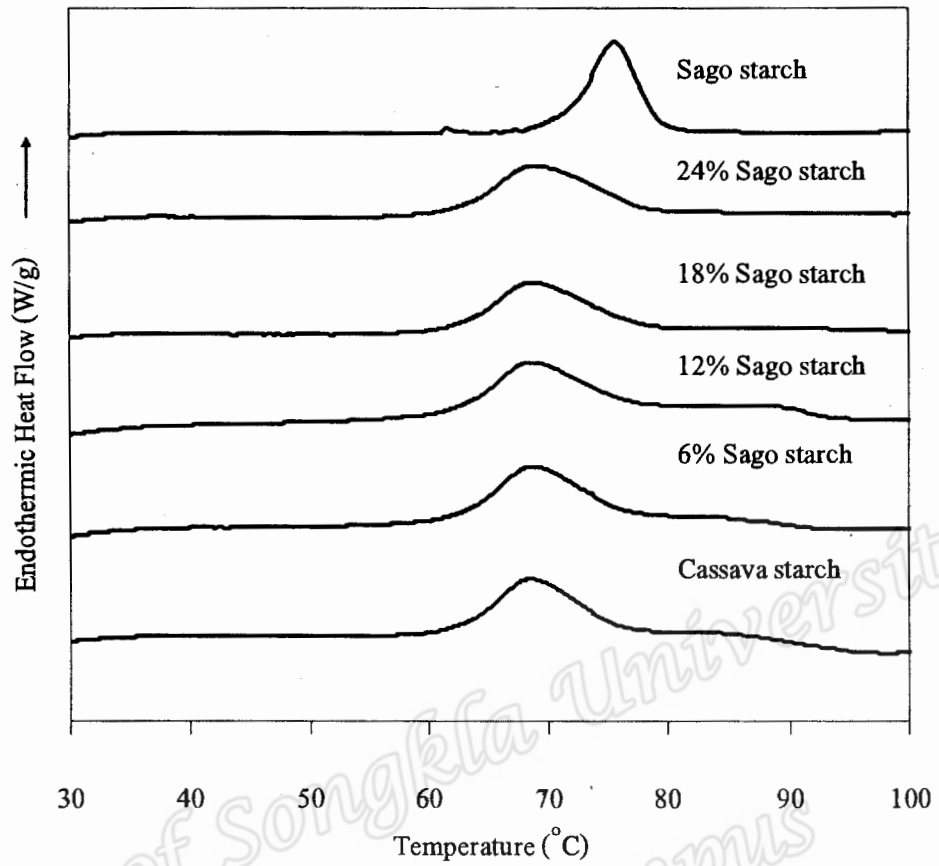
Each value is the mean of duplicate  $\pm$  SD.

The different superscripts in the column denote the significant differences ( $p \leq 0.05$ ).

สำหรับแป้งผสม พบว่าช่วงอุณหภูมิของกระบวนการเกิดเจลลาติโนเซชันของจะครอบคลุมช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลาติโนเซชันของแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาข กล่าวคือ อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลาติโนเซชันของแป้งผสมจะใกล้เคียงกับแป้งมันสำปะหลังซึ่งมี

ค่าต่ำกว่าแป้งสาคู และอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลลิตในเซชันของแป้งผสมจะเพิ่มขึ้นและมีค่าใกล้เคียงแป้งสาคูมากขึ้น เมื่อสัดส่วนแป้งสาคูเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลให้ช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตในเซชันของแป้งผสม กว้างกว่าแป้งเดี่ยวๆ ทั้งสองชนิด โดยปริมาณอะมิโลสที่สูงขึ้นในแป้งผสมอาจมีส่วนทำให้อุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชันสูงขึ้น เช่นเดียวกับรายงานของ Knutson (1990) และ Varavinit *et al.* (2003) การเกิดเจลลิตในเซชันของแป้งผสมชนิดอื่นๆก็เกิดในลักษณะเดียวกัน เช่น สมบัติของแป้งผสมระหว่างแป้งแป้งมันฝรั่ง-แป้งข้าวโพดเหนียว และแป้งข้าวโพดเหนียว-แป้งข้าวบาร์เลย์ที่สัดส่วน 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 ให้ลักษณะเทอร์โมแกรม DSC เป็น 2 พีก เนื่องจากมีช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชันต่างกัน ในขณะที่แป้งผสมระหว่างมันฝรั่ง-แป้งข้าวบาร์เลย์มีพีกปรากฏเพียงพีกเดียว ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของแป้งแต่ละชนิดเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน ทำให้เกิดการซ้อนทับกันระหว่างพีกของแป้งทั้งสอง (Ortega-Ojeda and Eliasson , 2001) ทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องจากพลังงานความร้อนที่สามารถทำลายโครงสร้างผลึกของแป้ง ทั้ง 2 ชนิด อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ดังนั้นแป้งผสมจึงมีอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตในเซชันเปลี่ยนแปลงไปจากแป้งเดี่ยว โดยมีผลให้อุณหภูมิเริ่มต้น และอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลลิตในเซชันเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการเกิดเจลลิตในเซชันของแป้งผสมจะเป็นลักษณะการแข่งขันระหว่างแป้งในสภาวะที่มีน้ำเนื่องจากความสามารถในการดูดซับและการพองตัวที่แตกต่างกัน (Hagenimana *et al.*, 2005)

Prince of Songkhla University  
Pattani Campus



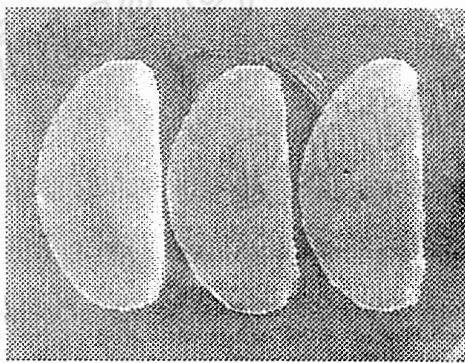
รูปที่ 4.8 อุณหภูมิการเกิดเจลในเซชันของแป้งดิบจากแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาकु และแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาकुที่มีปริมาณแป้งสาकुเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 6, 12, 18 และ 24

### 4.3 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของข้าวเกรียบแป้งผสมก่อนและหลังการทอด

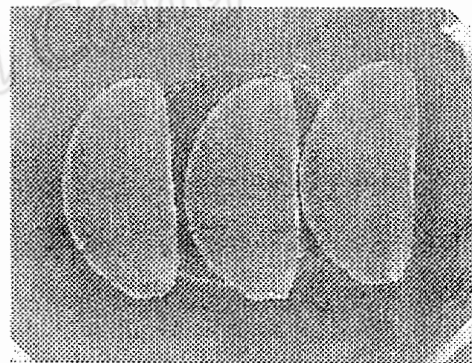
จากการทดลองผลิตข้าวเกรียบแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาธูตามกระบวนการผลิตในข้อ 3.4.3 (บทที่ 3) โดยกำหนดปัจจัยที่ศึกษาคือ ปริมาณร้อยละของแป้งสาธูในแป้งผสมเท่ากับ 5 ระดับ (คือเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24) และระยะเวลาการนึ่ง 8 ระดับ (คือเท่ากับ 25, 35, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 นาที) ซึ่งในการทดลองจะตรวจวิเคราะห์สมบัติของข้าวเกรียบแป้งผสมก่อนการทอดและหลังการทอด เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งในระหว่างกระบวนการผลิตข้าวเกรียบ ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

#### 4.3.1 สมบัติของข้าวเกรียบแป้งผสมก่อนการทอด

แผ่นข้าวเกรียบแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาธูที่ได้มีลักษณะสีใสแววดังรูปที่ 4.9 ซึ่งแผ่นข้าวเกรียบจากทุกชุดการทดลองมีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 8-9 (ตารางที่ 4.6) ตรวจวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของข้าวเกรียบแป้งผสมก่อนการทอด ได้แก่ ลักษณะมอลดีสโครส รูปแบบโครงสร้างผลึก ระดับของการเกิดเจลลิตินในเซชัน ความสามารถในการดูดซับและละลายน้ำ ผลการศึกษาเป็นดังนี้



(a)



(b)

รูปที่ 4.9 ภาพตัดขวางของแผ่นข้าวเกรียบดิบซึ่งเตรียมจากแป้งมันสำปะหลัง (a) และแป้งผสมที่มีปริมาณแป้งสาธูเป็นส่วนผสมร้อยละ 24 (b) ภายหลังจากการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 60 นาที

ตารางที่ 4.6 ปริมาณความชื้นของข้าวเกรียบที่ยังไม่ผ่านการทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสตาร์ชที่มีปริมาณแบ่งสตาร์ชเป็น ส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

% Sago starch	Moisture content (%)											
	Steaming time (min)											
	25	35	45	60	75	90	105	120				
0 (Cassava starch)	8.56±0.17	8.91±0.18	8.81±0.15	8.43±0.04	8.47±0.34	8.30±0.24	8.22±0.17	8.20±0.11				
6	8.65±0.09	8.56±0.20	8.75±0.08	8.52±0.04	8.40±0.30	8.25±0.25	8.31±0.16	8.32±0.24				
12	8.49±0.32	8.76±0.18	8.67±0.29	8.28±0.21	8.59±0.26	8.41±0.27	8.18±0.11	8.40±0.18				
18	8.72±0.16	8.79±0.30	8.71±0.24	8.44±0.07	8.39±0.28	8.33±0.16	8.33±0.07	8.52±0.13				
24	8.90±0.05	8.74±0.57	8.53±0.23	8.17±0.16	8.51±0.37	8.67±0.12	8.49±0.32	8.37±0.28				

Note: Each value is the mean of triplicate ± SD

All raw crackers were prepared by steaming the starch mixtures at 100 °C for 25-120 min, followed by drying at 55-60 °C for 3-4 h.

#### 4.3.1.1 ลักษณะมอลติสโครสของข้าวเกรียบแป้งผสม

โดยทั่วไปความสามารถในการเบียงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ของแป้ง และปรากฏลักษณะมอลติสโครสจะพบในกรณีของแป้งดิบ เนื่องจากเม็ดแป้งมีลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งผลึก โครงสร้างผลึกในเม็ดแป้ง เป็นส่วนที่มีสมบัติในการเบียงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ (Eliasson and Gudmundsson, 1996; Hosney, 1994) และแป้งที่ผ่านเกิดเจลาตินเซชันโดยสมบูรณ์ จะสูญเสียคุณสมบัติดังกล่าว (Atwell *et al.*, 1988; Biliaderis, *et al.*, 1980; Donovan, 1979; Evans and Haisman, 1982; Stevens and Elton, 1981) ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นก่อนการแตกของเม็ดแป้ง (Yeh and Li, 1996)

จากการตรวจลักษณะดังกล่าวของตัวอย่างโคข้าวเกรียบแป้งผสมหลังการนึ่งทุกชุดการทดลอง พบว่ายังคงมองเห็นลักษณะที่เกิดจากการเบียงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ในข้าวเกรียบแป้งผสมทุกชุดการทดลอง ยกเว้นก้อนโคของข้าวเกรียบแป้งมันสำปะหลังซึ่งเป็นชุดควบคุม (รูปที่ 4.10a-4.10b) โดยที่มีทั้งลักษณะที่เป็นมอลติสโครสที่สมบูรณ์และไม่สมบูรณ์ และลักษณะดังกล่าวเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณของแป้งสาकुในแป้งผสมเพิ่มขึ้น จึงอาจเป็นไปได้ว่าลักษณะดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากแป้งสาकुที่กระจายอยู่บนก้อนโคของข้าวเกรียบแป้งผสมและแม้ระยะเวลาการนึ่งที่นานถึง 120 นาที ก็พบว่ายังสามารถมองเห็นลักษณะที่เกิดจากการเบียงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ปรากฏอยู่ แต่การกระจายและปริมาณที่เห็นจะลดลงเมื่อระยะเวลาการนึ่งนานขึ้น ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าเม็ดแป้งในโคข้าวเกรียบแป้งผสมเกิดการเจลาตินเซชันที่ไม่สมบูรณ์ และมีโครงสร้างผลึกบางส่วนที่ยังไม่ถูกทำลาย จึงแสดงคุณสมบัติในการเบียงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์เมื่อส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์ระนาบแสงโพลาไรซ์ ซึ่งน่าจะเป็นเม็ดแป้งสาकुเป็นส่วนใหญ่ เพราะปริมาณมากขึ้น เมื่อปริมาณของแป้งสาकुเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิการเกิดเจลาตินเซชันของแป้งสาकु ( $66.85-79.10^{\circ}\text{C}$ ) สูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง ( $62.67-76.15^{\circ}\text{C}$ ) ทำให้แป้งสาकुเกิดการเจลาตินเซชันได้ช้ากว่าแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งนั่นหมายความว่าโครงสร้างของโมเลกุลและการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของแป้งสาकुมีความแข็งแรงมากกว่าแป้งมันสำปะหลัง ดังนั้นในระหว่างการนึ่งก้อนโคของแป้งผสมระหว่างแป้งทั้งสองชนิดดังกล่าวเกิดการแข่งขันในการจับกับโมเลกุลของน้ำและคู่ควบน้ำ โดยแป้งมันสำปะหลังถูกทำลายและเกิดเจลาตินเซชันได้เร็วกว่า ส่งผลให้เกิดการดูดซับน้ำที่อยู่รอบๆ เม็ดแป้งได้มากกว่าแป้งสาकु ทำให้เม็ดแป้งสาकुมีโอกาสสูงในการเกิดเจลาตินเซชันที่ไม่สมบูรณ์

ปัจจัยหนึ่งที่มีผลให้เม็ดแป้งบางส่วนในก้อนโคของข้าวเกรียบแป้งผสมเกิดเจลาตินเซชันได้ไม่สมบูรณ์ถึงแม้ระยะเวลาการนึ่งนาน 2 ชั่วโมง คือ ในระหว่างการนึ่งให้ความร้อนก้อนโค อาจเป็นผลเนื่องจากน้ำที่อยู่บริเวณผิวชั้นนอกของก้อนโคเกิดการระเหย ทำให้น้ำที่จุด

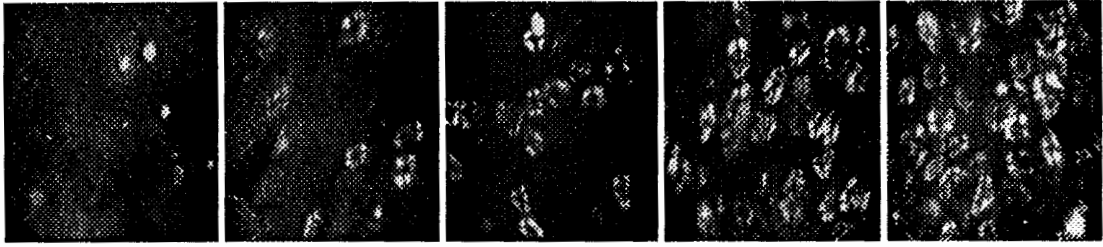
กึ่งกลางของก้อนโคเคล็อนตัวออกสู่ชั้นนอกทำให้มีน้ำเหลืออยู่บริเวณตรงกลางก้อนโค ไม่เพียงพอที่ช่วยให้เม็ดแป้งสามารถเกิดเจลาตินในเซชันได้

จากการศึกษาของ Kyaw *et al.* (2001b) พบว่าข้าวเกรียบที่มีเนื้อปลาอยู่ร้อยละ 0 และ 10 ไม่สามารถเกิดเจลาตินในเซชันได้อย่างสมบูรณ์ภายหลังการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°C นานถึง 100 นาที ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบปริมาณความชื้นระหว่างบริเวณจุดกึ่งกลางและส่วนด้านนอกของก้อนโคข้าวเกรียบ พบว่ากรณีที่ไม่มีเนื้อปลาหรือมีเนื้อปลาผสมอยู่เพียงร้อยละ 10 ปริมาณความชื้นมีความแตกต่างกัน กล่าวคือความชื้นจุดกึ่งกลางมีปริมาณน้อยกว่าส่วนด้านนอกของก้อนโคข้าวเกรียบ ทั้งนี้เนื่องจากการสูญเสียน้ำจากภายในก้อนโคของข้าวเกรียบออกสู่ภายนอกในระหว่างการนึ่ง อาจมีผลทำให้ปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดเจลาตินในเซชันโดยสมบูรณ์ได้

Prince of Songkla University  
Pattani Campus

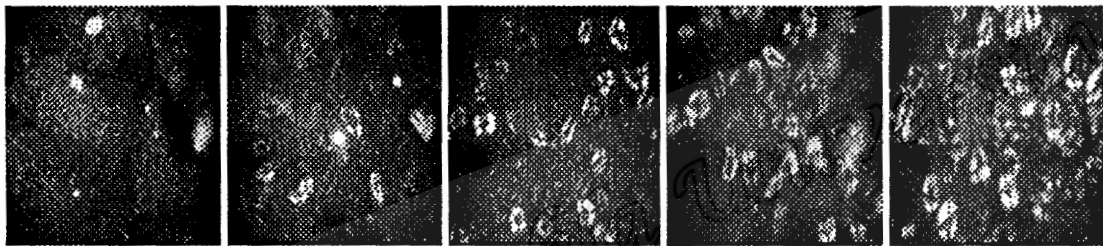


**(a) Steaming time for 25 min**



Cassava starch    6% Sago starch    12% Sago starch    18% Sago starch    24% Sago starch

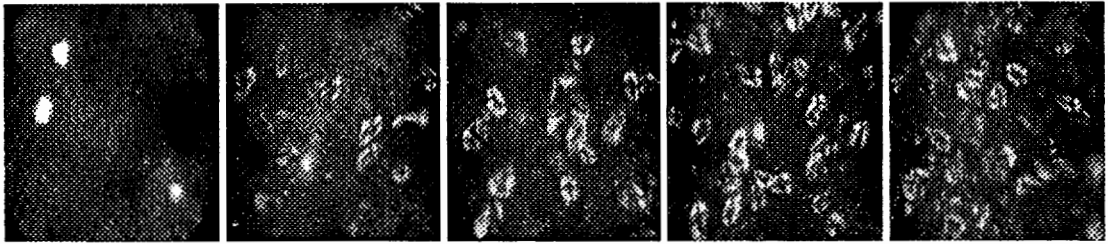
**(b) Steaming time for 35 min**



Cassava starch    6% Sago starch    12% Sago starch    18% Sago starch    24% Sago starch

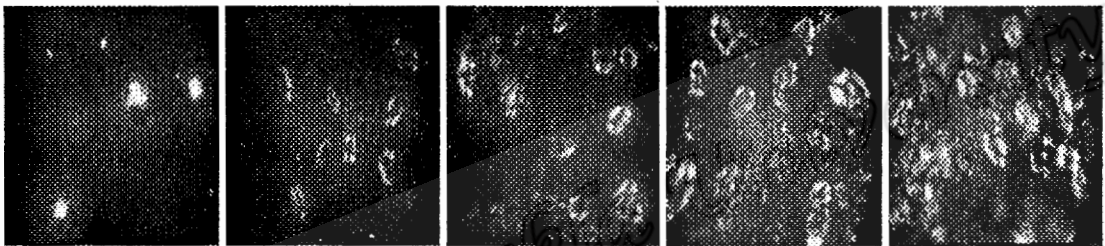
รูปที่ 4.10 ลักษณะมอลติสโครของโคข้าวเกรียบที่ยังไม่ผ่านการทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคุที่มีปริมาณแป้งสาคุเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24 ภายหลังจากการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  ระยะเวลา 25 นาที (a), 35 นาที (b), 45 นาที (c), 60 นาที (d), 75 นาที (e), 90 นาที (f), 105 นาที (g) และ 120 นาที (h) ภายใต้อุปกรณ์จุลทรรศน์ระนาบแสงโพลาไรซ์ที่กำลังขยาย 400 เท่า

**(c) Steaming time for 45 min**



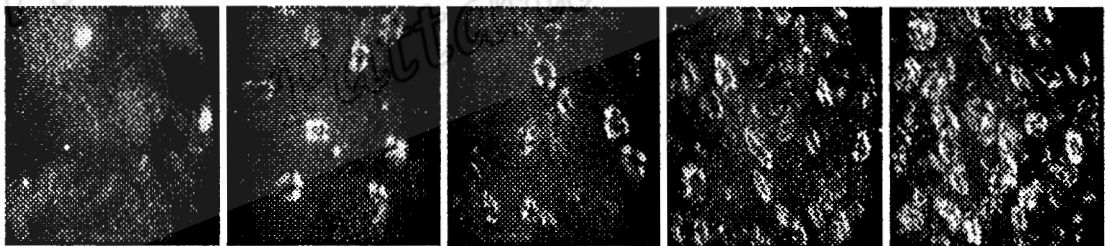
Cassava starch    6% Sago starch    12% Sago starch    18% Sago starch    24% Sago starch

**(d) Steaming time for 60 min**



Cassava starch    6% Sago starch    12% Sago starch    18% Sago starch    24% Sago starch

**(e) Steaming time for 75 min**



Cassava starch    6% Sago starch    12% Sago starch    18% Sago starch    24% Sago starch

รูปที่ 4.10 (ต่อ)

**(f) Steaming time for 90 min**



Cassava starch    6% Sago starch    12% Sago starch    18% Sago starch    24% Sago starch

**(g) Steaming time for 105 min**



Cassava starch    6% Sago starch    12% Sago starch    18% Sago starch    24% Sago starch

**(h) Steaming time for 120 min**



Cassava starch    6% Sago starch    12% Sago starch    18% Sago starch    24% Sago starch

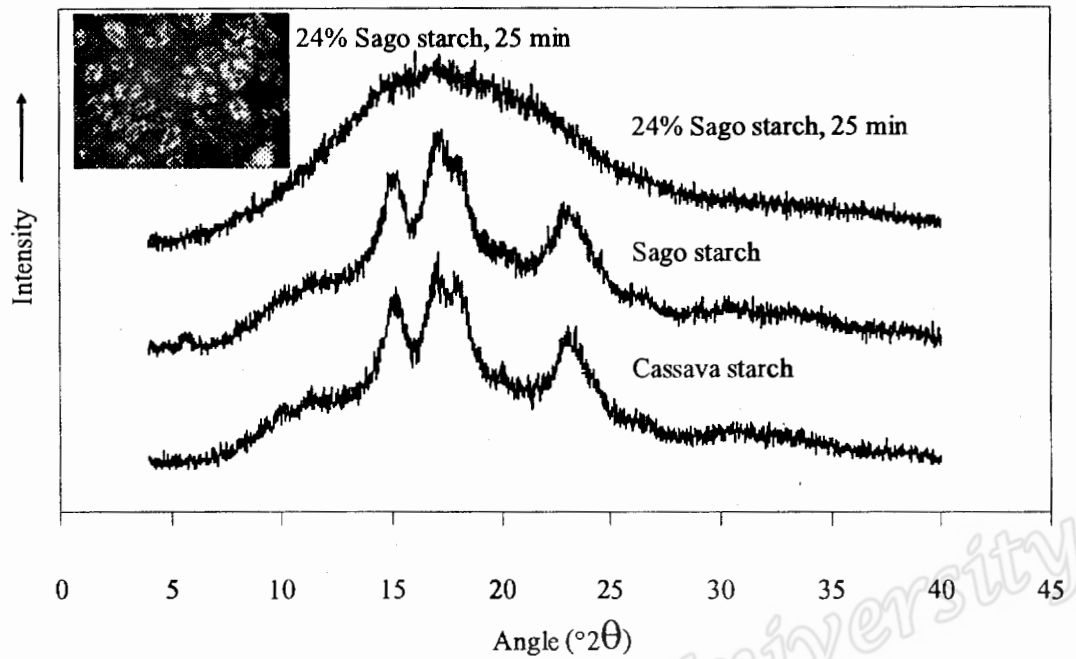
รูปที่ 4.10 (ต่อ)

#### 4.3.1.2 รูปแบบโครงสร้างผลึกของข้าวเกรียบแป้งผสม

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD นอกจากจะใช้ตรวจสอบชนิดของโครงสร้างผลึกในแป้งดิบแล้วยังสามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกในเม็ดแป้งอันเป็นผลจากการแปรรูปได้ ในตัวอย่างแป้งดิบพืคที่ปรากฏให้เห็นจะบ่งบอกถึงความ เป็นผลึกของโครงสร้างเม็ดแป้ง และภายหลังแป้งเกิดเจลาติไนเซชันโดยสมบูรณ์เป็นผลให้ โครงสร้างผลึกถูกทำลายเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) โดยจะไม่ปรากฏพืคดังกล่าวที่ พบในแป้งดิบ (Slade, 1984; Zobel *et al.*, 1988) จากการทดลองวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึก ของข้าวเกรียบแป้งผสมก่อนการทอดที่มีปริมาณแป้งสาคร้อยละ 0-24 ภายหลังผ่านการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน 25-120 นาที โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงรูปแบบผลึกจาก ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A ที่พบในแป้งดิบทั้ง 2 ชนิดของแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคร กับข้าวเกรียบแป้งผสมก่อนการทอดโดยเลือกชุดการทดลองที่มีปริมาณแป้งสาครมากที่สุด (ร้อยละ 24) และระยะเวลาสั้นน้อยที่สุด (25 นาที) ทั้งนี้เนื่องจากผลการวิเคราะห์ลักษณะมอลติสโครส ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ระนาบแสงโพลาไรซ์ พบว่าสามารถสังเกตเห็นลักษณะมอลติสโครสได้ ชัดเจนที่ระยะเวลานึ่งน้อยและลักษณะดังกล่าวเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณแป้งสาครเพิ่มขึ้น ดังผลในข้อ 4.3.1.1 ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่าเม็ดแป้งใน โดยของข้าวเกรียบแป้งผสมเกิดการเจลาติไนเซชันที่ไม่สมบูรณ์ และมีโครงสร้างผลึกบางส่วนที่ยังไม่ถูกทำลาย ซึ่งเมื่อตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD พบว่ามีการ เปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ A ที่พบในแป้งดิบ ซึ่งให้พืคที่ 15, 17, 18 และ  $23^{\circ}2\theta$  เปลี่ยนเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐานและไม่ปรากฏพืคใดๆ ที่แสดงถึงความเป็นผลึก ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงว่าโครงสร้างผลึกถูกทำลายโดยความร้อนในระหว่างการนึ่ง ซึ่งกรณีของข้าวเกรียบแป้ง ผสมก่อนทอดที่มีปริมาณแป้งสาครร้อยละ 24 และระยะเวลานึ่งนาน 25 นาที เป็นชุดการทดลองที่ ระยะเวลานึ่งน้อยที่สุด พบว่าไม่มีพืคของโครงสร้างผลึกปรากฏอยู่เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบที่มี ลักษณะของการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกแบบ A แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผลึกของแผ่นข้าว เกรียบถูกทำลายทำให้จึงไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง XRD ดังนั้นการเปลี่ยนแปลง ลักษณะโครงสร้างผลึกของข้าวเกรียบแป้งผสมในชุดการทดลองที่มีปริมาณของแป้งสาครน้อยกว่า (ร้อยละ 6, 12 และ 18) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งดิบผสมแบบ A เหมือนกัน และเมื่อผ่าน การทำให้สุกโดยการนึ่งที่ระยะเวลานานขึ้น (35-120 นาที) ความร้อนอาจมีผลให้โครงสร้างผลึก และโครงสร้างโมเลกุลของเม็ดแป้งถูกทำลายเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังนั้นอาจส่งผลให้ลักษณะ โครงสร้างผลึกของข้าวเกรียบแป้งผสมก่อนทอดในชุดการทดลองดังกล่าว มีการเปลี่ยนแปลงจาก ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A ที่พบในแป้งดิบผสมเปลี่ยนเป็น โครงสร้างแบบอสัณฐานไม่แตกต่างกัน

ซึ่งผลการวิเคราะห์จากเครื่อง XRD ไม่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ลักษณะมอลติสโครอสของข้าวเกรียบแป้งผสมก่อนทอด โดยทั่วไปการที่แป้งดิบมีความสามารถในการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์เป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวอย่างมีระเบียบของโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างผลึกภายในเม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งมีคุณสมบัติในการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ เมื่อส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์ระนาบแสงโพลาไรซ์ (Hoseney, 1994) ดังนั้นข้าวเกรียบแป้งผสมภายหลังจากการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°C การที่เม็ดแป้งตรงกึ่งกลางก้อนโคของข้าวเกรียบแป้งผสมยังมีความสามารถในการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์อยู่ แสดงให้เห็นว่าอาจจะมีโครงสร้างผลึกบางส่วนของเม็ดแป้งยังไม่ถูกทำลายในระหว่างนึ่งด้วยไอน้ำ ทำให้เม็ดแป้งไม่สามารถเกิดเจลาตินในเซชันได้สมบูรณ์

หากเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD นี้กับการวิเคราะห์ลักษณะมอลติสโครอสของข้าวเกรียบแป้งผสมก่อนในชุดการทดลองเดียวกัน (รูปที่ 4.11) พบว่าชุดการทดลองดังกล่าวยังแสดงให้เห็นลักษณะมอลติสโครอสซึ่งแสดงถึงความ เป็นผลึก ในผลการทดลองนี้ จึงอาจกล่าวได้ว่าการใช้เทคนิค XRD ในการตรวจสอบการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งมีความเหมาะสมและให้ผลที่ถูกต้องน้อยกว่าการใช้กล้องจุลทรรศน์ระนาบแสงโพลาไรซ์ ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่ามีความขัดแย้งกันระหว่างผลการตรวจวิเคราะห์รูปแบบของโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD และการตรวจสอบคุณสมบัติในการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ ดังนั้น จึงวิเคราะห์ระดับของการเกิดเจลาตินในเซชันด้วยเครื่อง DSC เพื่อการยืนยันผลของกระบวนการเกิดเจลาตินในเซชันของข้าวเกรียบ (Donovan, 1979)



รูปที่ 4.11 รูปแบบโครงสร้างผลึกของแป้งดิบ (แป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคุ) และแผ่นข้าวเกรียบที่ยังไม่ผ่านการทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคุที่มีปริมาณแป้งสาคุเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 24

#### 4.3.1.3 ระดับของการเกิดเจลลิตินเซชัน

การตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC เป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถตรวจสอบกระบวนการเกิดเจลลิตินเซชันของแป้งได้ โดยทั่วไปแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนจะไม่พบพิกการเกิดเจลลิตินเซชันของแป้งหากเมื่อกระบวนการเกิดเจลลิตินเซชันเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ (Atwell *et al.*, 1988; Donovan, 1979; Eliasson and Gudmundsson, 1996) ผลจากการวิเคราะห์ระดับของการเกิดเจลลิตินเซชันของแผ่นข้าวเกรียบแป้งผสม เมื่อมีปริมาณแป้งสาคุเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24 ภายหลังจากการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน 25-120 นาที สุดท้ายนำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ  $55-60^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 3-4 ชั่วโมง พบว่าเทอร์โมแกรม DSC ของข้าวเกรียบแป้งผสมในทุกชุดการทดลองจะปรากฏพิกของการเกิดเจลลิตินเซชันดังแสดงในรูปที่ 4.12a-4.12b โดยมีค่า  $T_o$ ,  $T_p$  และ  $T_c$  อยู่ในช่วงอุณหภูมิ  $41.00-44.44$ ,  $49.17-50.92$  และ  $56.05-60.96^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ (ตารางที่ 4.7) นอกจากนี้มีค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลิตินเซชันอยู่ระหว่าง 2.46-6.69 จูลต่อกรัม โดยอุณหภูมิและพลังงานเอนทัลปี ที่ใช้ในการเกิดเจลลิตินเซชันลดลงในทุกชุดการ

ทดลอง เมื่อระยะเวลาในการนึ่งเพิ่มขึ้น แต่มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองของแป้งผสมดิบ ซึ่งมีอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชันอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 62.67-78.55 °ซ และมีค่าพลังงานในการเกิดเจลลิตินในเซชันอยู่ระหว่าง 13.53-15.08 จูลต่อกรัม

เมื่อพิจารณาอันดับของการเกิดเจลลิตินในเซชัน (Degree of gelatinization) ของข้าวเกรียบแป้งผสมที่ปริมาณแป้งสาकुและระยะเวลาการนึ่งต่างกัน (รูปที่ 4.13) โดยเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานในการเกิดเจลลิตินในเซชันของข้าวเกรียบแป้งผสมกับค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลิตินในเซชันของแป้งดิบ พบว่าปริมาณของแป้งสาकुและระยะเวลาการนึ่งที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อระดับการเกิดเจลลิตินในเซชันของข้าวเกรียบแป้งผสมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ดังตารางภาคผนวกที่ 6 โดยที่ระดับของการเกิดเจลลิตินในเซชันมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 55.46-83.12 (ตารางที่ 4.8) ปริมาณของแป้งสาकुในแป้งผสมที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระดับการเกิดเจลลิตินในเซชันของข้าวเกรียบแป้งผสมมีแนวโน้มลดลง ระยะเวลาในการนึ่งก็มีผลต่อระดับของการเกิดเจลลิตินในเซชัน คือเมื่อเพิ่มระยะเวลาการนึ่งนานขึ้น ส่งผลให้ระดับการเกิดเจลลิตินในเซชันของข้าวเกรียบแป้งผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะ โครงสร้าง โมเลกุลของเม็ดแป้งถูกทำลายมากขึ้น จึงส่งผลให้ระดับของการเกิดเจลลิตินในเซชันเพิ่มขึ้น บ่งชี้ให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลานึ่งนานขึ้นจะมีผลทำให้ข้าวเกรียบแป้งผสมมีระดับของการสุกเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งในช่วงระยะเวลานึ่งนาน 25-60 นาที พบว่าระดับการเกิดเจลลิตินในเซชันของข้าวเกรียบแป้งผสมมีค่าเพิ่มขึ้น โดยข้าวเกรียบทุกชุดการทดลองที่ระยะเวลานึ่งนาน 60 นาที มีระดับการเกิดเจลลิตินในเซชันแตกต่างกับที่ระยะเวลานึ่งนาน 45 นาที อย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ดังตารางภาคผนวกที่ 6 แต่อย่างไรก็ตามภายหลังจากที่ระยะเวลานึ่งนานขึ้น 75-120 นาที พบว่าระดับการสุกของข้าวเกรียบแป้งผสมของกลุ่มชุดการทดลองที่ระยะเวลานึ่งนาน 60-120 นาที ไม่มีความแตกต่างกัน

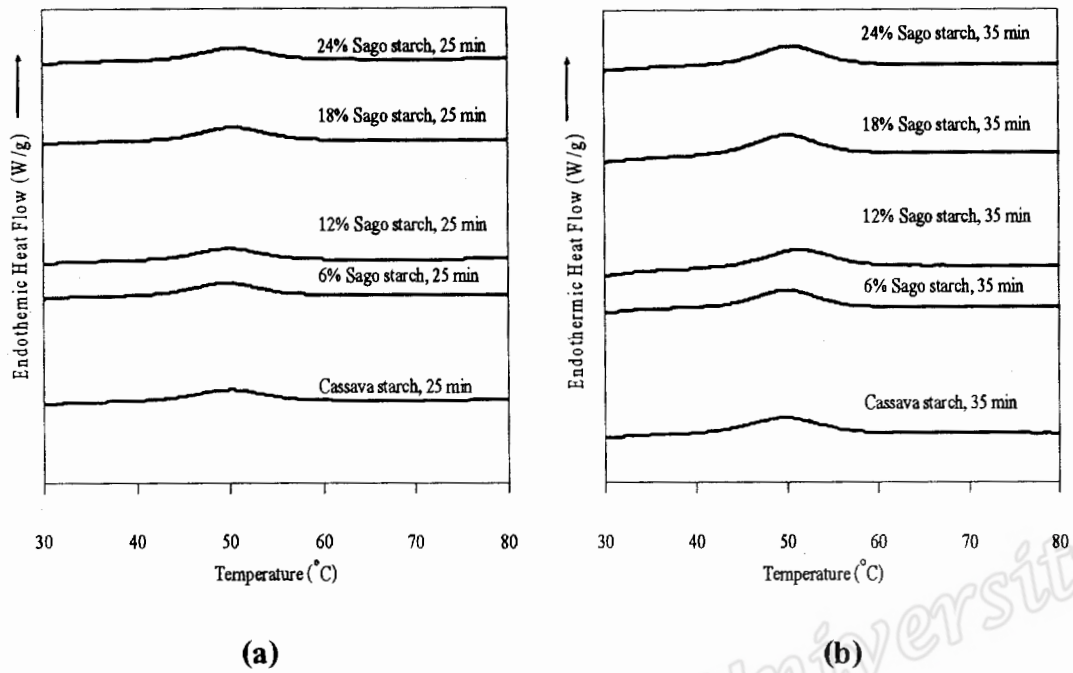
จากผลการวิเคราะห์ระดับของการเกิดเจลลิตินในเซชันของของข้าวเกรียบแป้งผสมด้วยเครื่อง DSC ที่ได้ แสดงให้เห็นว่ายังมีโครงสร้างผลึกบางส่วนที่ไม่ถูกทำลาย จึงทำให้ข้าวเกรียบแป้งผสมแสดงสมบัติในการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ปรากฏออกมา โดยเมื่อพิจารณาอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชันของแป้งดิบผสม (62.76-78.55 °ซ) จะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชันของแป้งมันสำปะหลัง (62.67-76.15 °ซ) ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชันของแป้งสาकुในแป้งผสมดิบมีค่าสูง (66.85-79.10 °ซ) จึงทำให้อุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลลิตินในเซชันของแป้งผสมดิบมีค่าเพิ่มขึ้น และยังส่งผลให้ช่วงของอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชันมีค่ากว้างขึ้นด้วย โดยเมื่อยิ่งเพิ่มปริมาณแป้งสาकुมากขึ้น อุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชันของแป้งผสมดิบก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทำให้ในระหว่างการนึ่งก้อนโดของข้าวเกรียบแป้งผสม จึงอาจเกิดสภาวะของการแข่งขันกันในการแย่งจับโมเลกุลของน้ำเพื่อใช้ในการเกิด

เจลาตินในเซชัน ทั้งนี้อุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งมันสำปะหลังที่ต่ำกว่าแป้งสาคู จึงสามารถเกิดเจลาตินในเซชันได้ก่อนแป้งสาคูและน้ำส่วนใหญ่ในระบบถูกดูดซับ แป้งสาคูซึ่งเกิดเจลาตินในเซชันได้ช้ากว่าจึงอาจจะไม่มีโมเลกุลน้ำเพียงพอในการเกิดเจลาตินในเซชัน ส่งผลให้มีเม็ดแป้งสาคูบางส่วนไม่สามารถเกิด เจลาตินในเซชันได้ โดยของข้าวเกรียบแป้งผสมจึงไม่สุกอย่างสมบูรณ์ และมีผลทำให้ระดับของการเกิดเจลาตินในเซชันของโคข้าวเกรียบแป้งผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของแป้งสาคูเพิ่มขึ้น ถึงแม้ระยะเวลาการนึ่งจะนานขึ้นถึง 120 นาทีก็ตาม

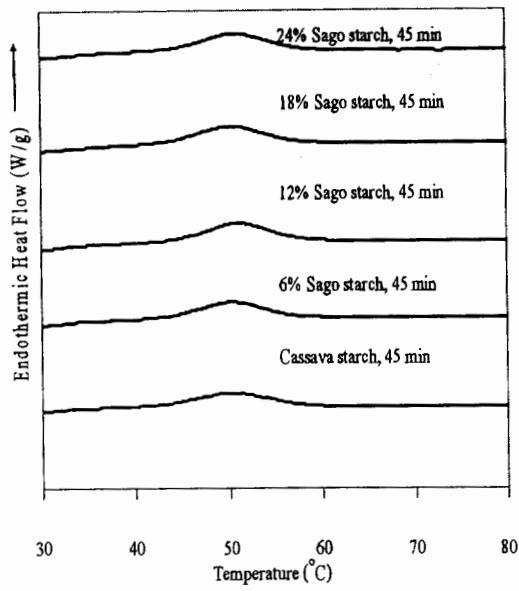
ดังนั้นผลวิเคราะห์ระดับการเกิดเจลาตินในเซชันโดยใช้เครื่อง DSC ในตัวอย่างข้าวเกรียบ จึงมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สมบัติของการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ในก้อนโคของข้าวเกรียบแป้งผสม แสดงให้เห็นว่าข้าวเกรียบแป้งผสมเกิดเจลาตินในเซชันได้ไม่สมบูรณ์ ในขณะที่เมื่อวิเคราะห์ความเป็นผลึกของข้าวเกรียบแป้งผสมด้วยเทคนิค XRD ให้ผลที่แตกต่างไป คือไม่พบความเป็นผลึกของตัวอย่าง เทคนิคดังกล่าวจึงไม่มีความเหมาะสมต่อการตรวจในการศึกษาครั้งนี้ ทั้งนี้เนื่องจากความร้อนจากการนึ่งด้วยไอน้ำอาจจะทำลายโครงสร้างโมเลกุลของแป้งถึงระดับที่ไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค XRD

Prince of Songkla University  
Pattani Campus

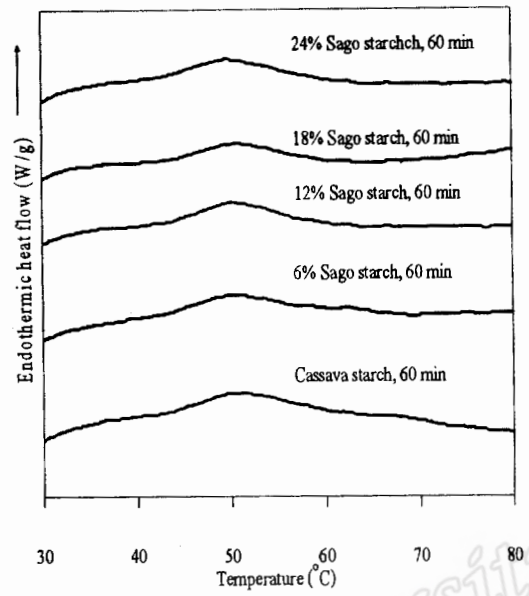




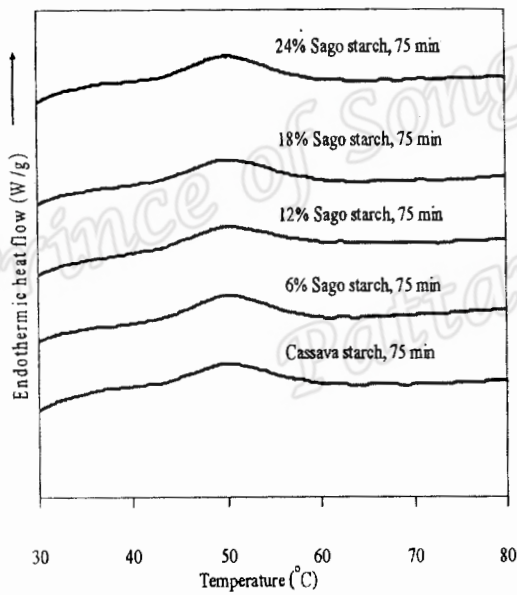
รูปที่ 4.12 ลักษณะเทอร์โมแกรมจาก DSC ของแผ่นข้าวเกรียบที่ยังไม่ผ่านการทอดซึ่งเตรียมจาก แป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับ ร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24 ภายหลังจากการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  ระยะเวลา 25 นาที (a), 35 นาที (b), 45 นาที (c), 60 นาที (d), 75 นาที (e), 90 นาที (f), 105 นาที (g) และ 120 นาที (h)



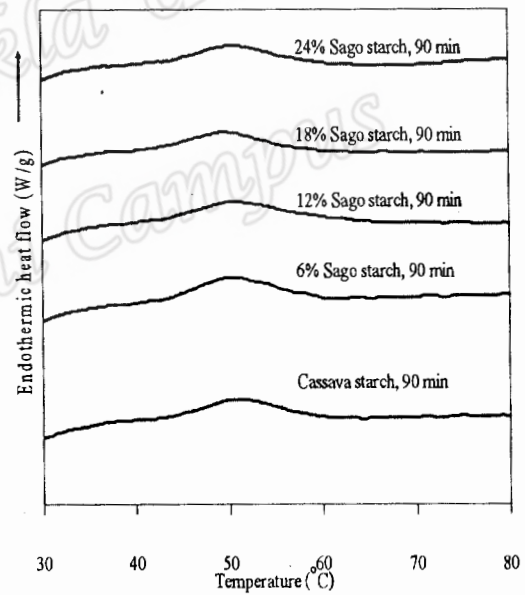
(c)



(d)

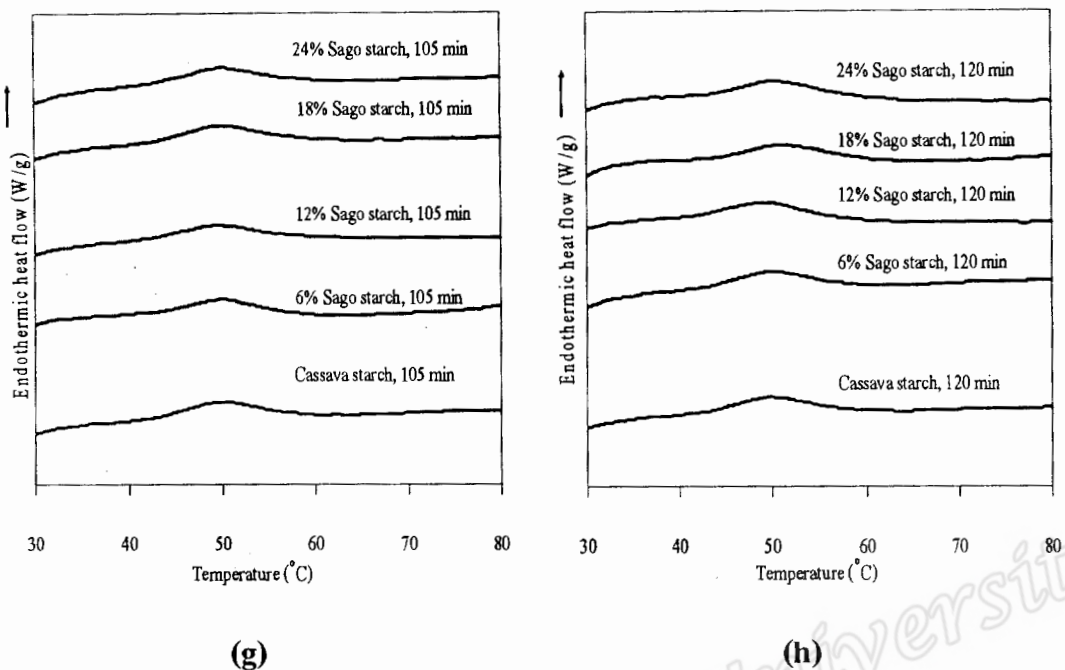


(e)



(f)

รูปที่ 4.12 (ต่อ)



รูปที่ 4.12 (ต่อ)

จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าในระบบของข้าวเกรียบที่มีแป้งเพียงอย่างเดียว เม็ดแป้งไม่สามารถจะเกิดเจลลาตินในเซชันได้อย่างสมบูรณ์แม้ว่าระยะเวลาในการนึ่งนานถึง 2 ชั่วโมง ทั้งนี้ปรากฏการณ์ดังกล่าวอาจแตกต่างกันไปถ้ามีส่วนผสมอื่นร่วมอยู่ด้วย เช่น มีโปรตีนจากปลา กลีโกลหรือน้ำตาล เป็นต้น จากรายงานของ Kyaw *et al.* (2001b) ที่ศึกษาผลของปริมาณเนื้อปลาที่ร้อยละ 0, 10, 15, 30 และ 50 พบว่าเม็ดแป้งตรงกึ่งกลางก้อนโดของข้าวเกรียบที่มีปริมาณเนื้อปลาร้อยละ 0 และ 10 ภายหลังจากนึ่งเป็นเวลานาน 100 นาที เกิดการเจลลาตินในเซชันได้ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากในระหว่างการนึ่งโมเลกุลของน้ำเกิดการเคลื่อนย้ายออกจากส่วนตรงกลางออกสู่ด้านนอกของก้อนโด ข้าวเกรียบ ประกอบกับส่วนรอบนอกของก้อนโดจะได้รับความร้อนสูงก่อนส่วนตรงกลางของก้อนโด ทำให้เม็ดแป้งบริเวณรอบนอกของก้อนโดซึ่งมีปริมาณน้ำและรับความร้อนได้สูงเกิดเจลลาตินในเซชันได้ก่อน ในขณะที่ส่วนตรงกลางที่ไม่สามารถเกิดเจลลาตินในเซชันได้ เนื่องจากการสูญเสียความชื้นจากส่วนด้านนอก ทำให้ไม่มีน้ำเพียงพอที่จะใช้ในการเกิดเจลลาตินในเซชัน อย่างไรก็ตามพบว่าเม็ดแป้งในก้อนโดของข้าวเกรียบจะเกิดเจลลาตินในเซชันได้อย่างสมบูรณ์เมื่อมีปริมาณของเนื้อปลาอยู่ร้อยละ 15 และปริมาณแป้งร้อยละ 85 ในระยะเวลาหนึ่งเพียง 30 นาที ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณของเนื้อปลาตั้งแต่ร้อยละ 15 ขึ้นไป มีผลทำให้โครงสร้างร่างแหของโปรตีนจากเนื้อปลาเริ่มพัฒนาขึ้น และส่งผลให้ความสามารถในการอุ้มน้ำของก้อนโดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยโปรตีนจาก

เนื้อปลาจะยึดจับโมเลกุลของน้ำในก้อนโคขาวเกรียบไว้ภายในโครงสร้างร่างแหของเจลโปรตีนจากเนื้อปลา ทำให้กำจัดการเคลื่อนย้ายและลดการสูญเสียของโมเลกุลน้ำในระหว่างการนึ่ง ทำให้มีน้ำเพียงพอที่จะช่วยให้แป้งเกิดเจลาตินในเซชันได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของระบบที่มีโปรตีน แป้งและน้ำภายในก้อนโคของข้าวเกรียบ เนื่องจากโปรตีนมีความสามารถในการดูดซับกับน้ำได้ดีกว่าแป้ง เมื่อได้รับความร้อนมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนในการเกิดเจลาตินก่อนกระบวนการเจลาตินในเซชันของแป้ง โดยระหว่างการเกิดเจลาตินเนื่องจากความร้อนโมเลกุลของน้ำจะถูกยึดจับกับโครงสร้างของเจลโปรตีน ทำให้เกิดเจลาตินที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบร่างแหของโปรตีนซึ่งมีโมเลกุลของน้ำที่ถูกจับอยู่ภายในโครงสร้างของเจล ทำให้โมเลกุลของน้ำไม่สามารถเคลื่อนที่ออกมาภายนอกได้โดยง่ายในระหว่างการนึ่ง โดยอนุภาคของแป้งที่แทรกตัวอยู่ในช่องว่างโครงสร้างร่างแหของเจลโปรตีนจะเกิดเจลาตินในเซชันได้รับความชื้นและความร้อนที่เหมาะสม ซึ่งเมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพของโปรตีน (Denature) ทำให้เกิดการรวมตัวกันของโปรตีน มีผลให้สูญเสียความสามารถในการยึดจับกับโมเลกุลของน้ำให้กับแป้ง โมเลกุลของน้ำจึงหลุดออกมาภายนอกโครงสร้างของโปรตีน และโมเลกุลของน้ำจะถูกนำมาใช้ในการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้ง ซึ่งเป็นผลให้เม็ดแป้งเริ่มเกิดเจลาตินในเซชันและเกิดการพองตัวขึ้น โดยเม็ดแป้งจะดูดซับโมเลกุลของน้ำที่ถูกปล่อยออกมาบริเวณรอบนอกของโครงสร้างร่างแหของเจลโปรตีนมาช่วยให้การเกิดเจลาตินในเซชันได้อย่างสมบูรณ์ (Wu *et al.*, 1985)

หากมีปริมาณของเนื้อปลาน้อยเกินไปมีผลให้กึ่งกลางของก้อนโคขาวเกรียบเกิดเจลาตินในเซชันไม่สมบูรณ์ เนื่องจากไม่มีน้ำเพียงพอในการเกิดเจลาตินในเซชัน โดยอาจจะเป็นผลจากการเคลื่อนย้ายของโมเลกุลน้ำในระหว่างการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้ง (Ghiasi *et al.*, 1982) ซึ่งการผสมเนื้อปลาในแป้งจะทำให้มีโมเลกุลของน้ำจำนวนมากถูกตรึงไว้กับโครงสร้างของโปรตีนทำให้โมเลกุลของน้ำไม่สามารถเคลื่อนย้ายออกจากก้อนโคได้ง่าย นอกจากนี้การเติมเกลือลงในข้าวเกรียบจะช่วยให้เม็ดแป้งสามารถเกิดเจลาตินในเซชันได้โดยสมบูรณ์ เนื่องจากเกลือจะช่วยละลายโปรตีนออกจากกล้ามเนื้อเนื้อปลาทำให้เกิดกระจายตัวของโปรตีนในระบบของแป้งและเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของโปรตีน มีผลทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถเข้าไปตรึงอยู่ภายในโครงสร้างแบบร่างแหของโปรตีนได้มากขึ้น ซึ่งการที่ผสมเนื้อปลาและเติมเกลือลงไปในการนึ่งข้าวเกรียบจะมีอิทธิพลทำให้อุณหภูมิของการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งเลื่อนสูงขึ้น โดยพบว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งมันสำปะหลังในข้าวเกรียบที่มีเนื้อปลาร้อยละ 50 และเกลือร้อยละ 2 อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 70-85°C (Cheow and Yu, 1997) ในกระบวนการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้ง น้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่มีบทบาทช่วยให้เกิดการเจลาตินในเซชันของแป้งในก้อนโคของข้าวเกรียบ ดังนั้นในระหว่างการเกิดเจลาตินของโปรตีน การที่โมเลกุลของน้ำจะถูกยึดจับและเคลื่อนที่อยู่ภายใน

โครงสร้างร่างแหของโปรตีน ทำให้โมเลกุลของน้ำที่นำมาใช้เพื่อให้เกิดการเจลาติไนเซชันของแป้ง ถูกจำกัด ซึ่งอาจส่งผลให้อุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งสูงขึ้น

ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันและพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชันของข้าวเกรียบที่ยังไม่ผ่านการทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคุที่มีปริมาณแป้งสาคุเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

Sago starch (%)	Steaming time (min)	Gelatinization temperature range	$\Delta H$ (J/g)
		$T_o-T_c$ ( $^{\circ}C$ )	
0 (Cassava starch)	25	42.33-58.08	$5.35 \pm 0.18$
	35	41.99-56.86	$5.19 \pm 0.32$
	45	42.45-57.05	$5.28 \pm 0.08$
	60	43.65-60.96	$2.54 \pm 0.34$
	75	43.14-58.19	$2.46 \pm 0.13$
	90	43.82-58.75	$2.74 \pm 0.07$
	105	42.05-57.82	$2.96 \pm 0.35$
	120	42.13-57.74	$2.75 \pm 0.21$
6	25	43.54-57.10	$5.83 \pm 0.04$
	35	43.23-56.44	$5.39 \pm 0.27$
	45	42.59-56.05	$5.52 \pm 0.01$
	60	42.40-59.23	$2.67 \pm 0.31$
	75	42.70-58.18	$3.31 \pm 0.01$
	90	42.37-58.32	$3.46 \pm 0.37$
	105	41.98-57.81	$3.08 \pm 0.14$
	120	41.71-57.90	$2.82 \pm 0.10$

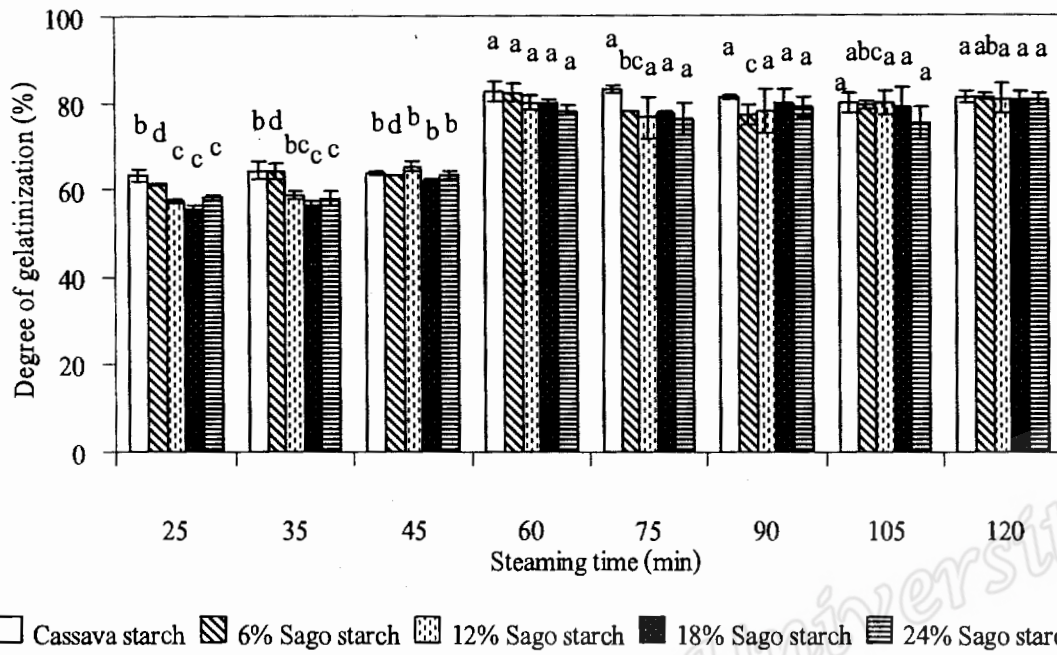
Note:  $T_o$  = Onset temperature;  $T_c$  = Conclusion temperature;  $\Delta H$  = Enthalpy (J/g of dry wt.)

All raw crackers were prepared by steaming the starch mixtures at  $100^{\circ}C$  for 25-120 min, followed by drying at  $55-60^{\circ}C$  for 3-4 h.

Each value is the mean of duplicate  $\pm$  SD.

ตารางที่ 4.7 (ต่อ)

Sago starch (%)	Steaming time (min)	Gelatinization temperature range	$\Delta H$ (J/g)
		$T_o-T_c$ ( $^{\circ}C$ )	
12	25	44.44-57.85	6.34 $\pm$ 0.06
	35	43.91-58.31	6.13 $\pm$ 0.11
	45	42.66-56.60	5.16 $\pm$ 0.16
	60	42.63-58.86	2.98 $\pm$ 0.25
	75	42.38-59.06	3.51 $\pm$ 0.69
	90	41.88-59.56	3.25 $\pm$ 0.75
	105	41.73-58.25	3.00 $\pm$ 0.38
	120	41.00-56.84	2.83 $\pm$ 0.52
18	25	42.93-57.55	6.69 $\pm$ 0.16
	35	42.94-56.41	6.54 $\pm$ 0.12
	45	43.52-56.82	5.70 $\pm$ 0.02
	60	41.88-59.73	2.80 $\pm$ 0.53
	75	41.87-59.98	3.39 $\pm$ 0.08
	90	42.84-58.45	3.02 $\pm$ 0.47
	105	42.77-58.56	3.14 $\pm$ 0.65
	120	43.10-58.66	2.89 $\pm$ 0.27
24	25	43.98-57.83	6.46 $\pm$ 0.10
	35	43.57-57.35	6.47 $\pm$ 0.28
	45	43.64-57.77	5.63 $\pm$ 0.15
	60	42.36-59.29	3.39 $\pm$ 0.18
	75	42.27-59.15	3.66 $\pm$ 0.55
	90	42.63-58.77	3.24 $\pm$ 0.33
	105	43.08-59.00	3.80 $\pm$ 0.57
	120	43.28-58.85	2.98 $\pm$ 0.19



รูปที่ 4.13 ระดับของการเกิดเจลลาตินในเซชันของแผ่นข้าวเกรียบที่ยังไม่ผ่านการทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคุที่มีปริมาณแป้งสาคุเป็นส่วนผสมเท่ากับ ร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

ตารางที่ 4.8 ระดับของการเกิดเจลลาตินในเซชันของข้าวเกรียบที่ยังไม่ผ่านการทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสตาร์ชที่มีปริมาณแป้งสตาร์ชเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

Sago starch (%)	Degree of gelatinization (%)									
	Steaming time (min)									
	25	35	45	60	75	90	105	120		
0% (Cassava starch)	63.37±1.23 <sup>b</sup>	64.43±2.17 <sup>b</sup>	63.84±0.56 <sup>b</sup>	82.60±2.34 <sup>a</sup>	83.12±0.92 <sup>a</sup>	81.21±0.46 <sup>a</sup>	79.72±2.39 <sup>a</sup>	81.16±1.43 <sup>a</sup>		
6	61.34±0.25 <sup>d</sup>	64.26±1.79 <sup>d</sup>	63.38±0.04 <sup>d</sup>	82.31±2.06 <sup>a</sup>	78.07±0.07 <sup>bc</sup>	77.06±2.45 <sup>c</sup>	79.55±0.92 <sup>abc</sup>	81.27±0.68 <sup>ab</sup>		
12	57.33±0.40 <sup>e</sup>	58.73±0.76 <sup>bc</sup>	65.30±1.08 <sup>b</sup>	79.92±1.67 <sup>a</sup>	76.40±4.63 <sup>b</sup>	78.10±5.03 <sup>a</sup>	79.83±2.58 <sup>a</sup>	80.95±3.52 <sup>a</sup>		
18	55.46±1.07 <sup>e</sup>	56.44±0.81 <sup>e</sup>	62.07±0.15 <sup>b</sup>	79.62±1.11 <sup>a</sup>	77.43±0.54 <sup>a</sup>	79.91±3.10 <sup>a</sup>	79.08±4.35 <sup>a</sup>	80.75±1.81 <sup>a</sup>		
24	58.06±0.64 <sup>e</sup>	58.00±1.80 <sup>e</sup>	63.44±1.01 <sup>b</sup>	78.01±1.17 <sup>a</sup>	76.22±3.58 <sup>a</sup>	78.96±2.17 <sup>a</sup>	75.36±3.70 <sup>a</sup>	80.65±1.25 <sup>a</sup>		

Note: Each value is the mean of triplicate ± SD.

The different superscripts in the row denote the significant differences ( $p \leq 0.05$ ).

All raw crackers were prepared by steaming the starch mixtures at 100°C for 25-120 min, followed by drying at 55-60°C for 3-4 h.



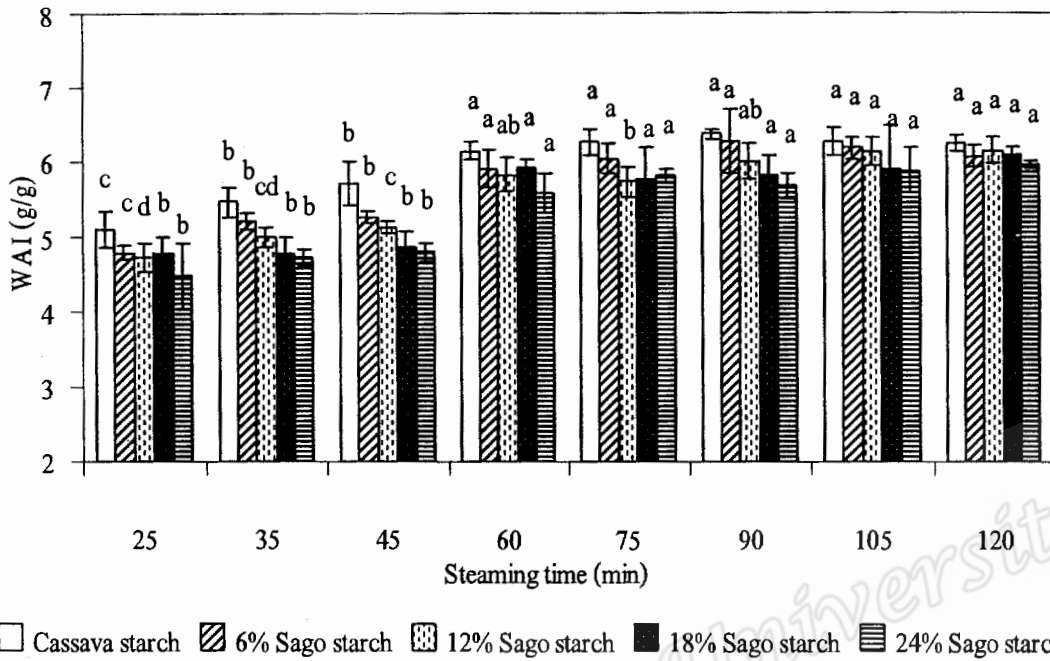
#### 4.3.1.4 ความสามารถในการดูดซับและละลายน้ำของข้าวเกรียบแป้งผสม

ผลจากการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับน้ำของแผ่นข้าวเกรียบแป้งผสมแห้งที่มีปริมาณแป้งสาคร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24 ภายหลังจากการนึ่งด้วยไอน้ำเป็นระยะเวลา 25-120 นาที พบว่าปริมาณของแป้งสาครในแป้งผสมและระยะเวลาที่แตกต่างกัน มีผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำของข้าวเกรียบแป้งผสมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ดังตารางภาคผนวกที่ 7 โดยเมื่อปริมาณแป้งสาครเพิ่มขึ้น มีผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง ขณะที่ระยะเวลานึ่งนานขึ้นมีผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำของข้าวเกรียบแป้งผสมเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.14) จากตารางที่ 4.9 พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของแผ่นข้าวเกรียบแห้งที่ระยะเวลานึ่งนาน 25, 35 และ 45 นาที มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการนึ่งเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับชุดการทดลองที่ระยะเวลานึ่งนาน 60, 75, 105 และ 120 นาที ความสามารถในการดูดซับน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อให้ระยะเวลานึ่งนานขึ้น แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกัน พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของทั้ง 2 กลุ่มดังกล่าวมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) แต่อย่างไรก็ตามพบว่าความสามารถในการดูดซับน้ำของชุดการทดลองข้าวเกรียบแป้งผสมที่มีปริมาณแป้งสาคร้อยละ 0 (มีเฉพาะแป้งมันสำปะหลัง) และ 6 มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลานึ่งนาน 105 และ 120 นาที

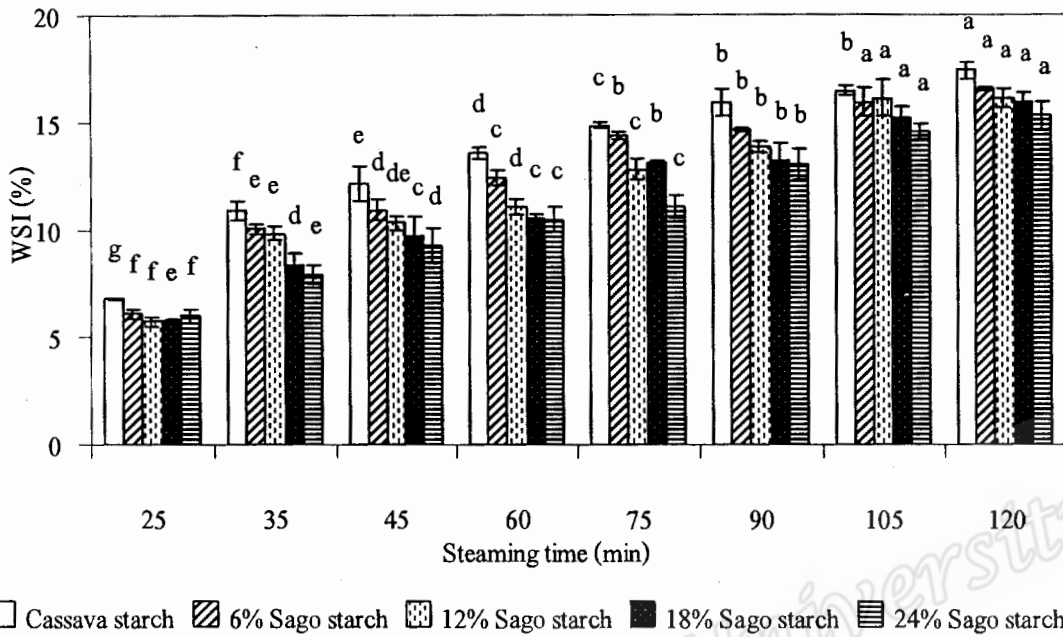
ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการละลายน้ำของแผ่นข้าวเกรียบแป้งผสมก่อนทอดพบว่า ปริมาณแป้งสาครและระยะเวลาการนึ่งมีผลต่อความสามารถในการละลายน้ำของข้าวเกรียบอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ดังตารางภาคผนวกที่ 8 กล่าวคือเมื่อปริมาณแป้งสาครเพิ่มขึ้นมีผลให้ความสามารถในการละลายน้ำลดลง ขณะที่ระยะเวลานึ่งที่เพิ่มขึ้น มีผลให้ความสามารถในการละลายน้ำของข้าวเกรียบแป้งผสมมีค่าเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.15) โดยมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 5.71-17.36

ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับน้ำ และการละลายน้ำของแป้งที่อุณหภูมิต่ำ ในสภาวะที่มีน้ำมากเกินพอ เป็นวิธีการวิเคราะห์ระดับการเปลี่ยนแปลงของแป้งในระหว่างกระบวนการแปรรูป ซึ่งค่าจะสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับระดับการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งและการแตกหักของโมเลกุล แป้งที่เกิดเจลาตินในเซชันอย่างสมบูรณ์และมีการแตกหักของโมเลกุลน้อยที่สุด ส่งผลให้ค่า WAI สูง สำหรับค่า WSI เป็นค่าที่วัดการละลายของโมเลกุลอิสระที่ถูกปลดปล่อยจากเม็ดแป้งในระหว่างการเกิดเจลาตินในเซชัน ซึ่งบ่งบอกถึงระดับการเกิดเจลาตินในเซชันและการแตกหักของโมเลกุลแป้ง ซึ่งหากมีการแตกหักของโมเลกุลสูง ส่งผลให้เกิดการละลายได้ดีขึ้นและค่า WSI ก็สูง (Aderson *et al.*, 1969; Colonna *et al.*, 1987; Olett *et al.*, 1990; Sriburi *et al.*,

1999) ซึ่งจากผลการทดลองนี้สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อปริมาณแป้งสาชูเพิ่มขึ้น มีผลให้ระดับการเกิดเจลาตินในเซชันของข้าวเกรียบแป้งผสมต่ำลง จึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับและละลายน้ำของข้าวเกรียบแป้งผสมมีค่าลดลง ขณะที่ระยะเวลาที่นึ่งนานขึ้น พบว่ามีผลให้ระดับของการเกิดเจลาตินในเซชันสูงขึ้น ทั้งนี้เมื่อระยะเวลาในระหว่างการนึ่งนานขึ้นมีผลให้เม็ดแป้งสามารถเกิดเจลาตินในเซชันได้มากขึ้น เม็ดแป้งสามารถพองตัวและเกิดการละลายเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำและค่าการละลายมีค่าสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามมีข้อยกเว้นสำหรับชุดการทดลองที่มีแป้งมันสำปะหลังอย่างเดี่ยวและมีปริมาณของแป้งสาชูร้อยละ 6 และระยะเวลาการนึ่งนาน 105 และ 120 นาที ซึ่งพบว่าความสามารถในการดูดซับน้ำมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากชุดการทดลองดังกล่าวประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลังทั้งหมดและเกือบทั้งหมด ซึ่งแป้งมันสำปะหลังมีอุณหภูมิของการเกิดเจลาตินในเซชันต่ำกว่าแป้งสาชู ประกอบกับระยะเวลาในการให้ความร้อนที่นานขึ้น ทำให้โมเลกุลของแป้งที่หลุดออกจากเม็ดแป้งในระหว่างกระบวนการเกิดเจลาตินในเซชันเกิดการแตกหักมากขึ้นจนสูญเสียความสามารถในการดูดซับน้ำ แต่เกิดการละลายเพิ่ม ดังนั้นข้าวเกรียบแป้งผสมที่ปริมาณแป้งสาชูร้อยละ 0 และ 6 จึงมีค่าความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง และส่งผลให้ความสามารถในการละลายมีค่าสูง เมื่อให้ระยะเวลานึ่งนานขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Hashimoto and Grossmann (2003) ที่พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิและแรงเฉือนในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันมีผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง แต่การละลายเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากเกิดการแตกหักของโมเลกุลแป้งมากขึ้น (Badire and Mellowes, 1991)



รูปที่ 4.14 ความสามารถในการดูดซับน้ำของแผ่นข้าวเกรียบที่ยังไม่ผ่านการทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาธูที่มีปริมาณแป้งสาธูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24



รูปที่ 4.15 ความสามารถในการละลายน้ำของข้าวเกรียบที่ยังไม่ผ่านการทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาธูที่มีปริมาณแป้งสาธูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

ตารางที่ 4.9 ความสามารถในการดูดซับน้ำของข้าวเกรียบที่ยังไม่ผ่านการทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสตาร์ชที่มีปริมาณแป้งสตาร์ชเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

Sago starch (%)	Water absorption index (g/g)									
	Steaming time (min)									
	25	35	45	60	75	90	105	120		
0 (Cassava starch)	5.09±0.24 <sup>c</sup>	5.46±0.20 <sup>b</sup>	5.72±0.29 <sup>b</sup>	6.15±0.12 <sup>a</sup>	6.27±0.18 <sup>a</sup>	6.37±0.07 <sup>a</sup>	6.28±0.19 <sup>a</sup>	6.24±0.10 <sup>a</sup>		
6	4.78±0.09 <sup>e</sup>	5.20±0.12 <sup>b</sup>	5.26±0.09 <sup>b</sup>	5.91±0.27 <sup>a</sup>	6.04±0.20 <sup>a</sup>	6.29±0.43 <sup>a</sup>	6.19±0.14 <sup>a</sup>	6.07±0.14 <sup>a</sup>		
12	4.71±0.18 <sup>d</sup>	4.98±0.14 <sup>cd</sup>	5.12±0.08 <sup>c</sup>	5.82±0.23 <sup>ab</sup>	5.73±0.20 <sup>b</sup>	6.01±0.23 <sup>ab</sup>	6.13±0.19 <sup>a</sup>	6.15±0.17 <sup>a</sup>		
18	4.77±0.22 <sup>b</sup>	4.77±0.21 <sup>b</sup>	4.84±0.22 <sup>b</sup>	5.92±0.12 <sup>a</sup>	5.78±0.42 <sup>a</sup>	5.82±0.26 <sup>a</sup>	5.91±0.59 <sup>a</sup>	6.08±0.12 <sup>a</sup>		
24	4.47±0.44 <sup>b</sup>	4.72±0.11 <sup>b</sup>	4.79±0.12 <sup>b</sup>	5.57±0.27 <sup>a</sup>	5.81±0.10 <sup>a</sup>	5.67±0.17 <sup>a</sup>	5.89±0.30 <sup>a</sup>	5.96±0.06 <sup>a</sup>		

Note: Each value is the mean of triplicate ± SD.

The different superscripts in the row denote the significant differences ( $p \leq 0.05$ ).

All raw crackers were prepared by steaming the starch mixtures at 100°C for 25-120 min, followed by drying at 55-60°C for 3-4 h.

ตารางที่ 4.10 ความสามารถในการละลายของข้าวเกรียบซึ่งไม่ผ่านการทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสตูที่มีปริมาณแป้งสตูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

Sago starch (%)	Water soluble index (%)											
	Steaming time (min)											
	25	35	45	60	75	90	105	120				
0 (Cassava starch)	6.79±0.04 <sup>e</sup>	10.84±0.43 <sup>f</sup>	12.11±0.77 <sup>g</sup>	13.52±0.26 <sup>d</sup>	14.84±0.13 <sup>c</sup>	15.88±0.60 <sup>b</sup>	16.43±0.24 <sup>b</sup>	17.36±0.42 <sup>a</sup>				
6	6.07±0.22 <sup>f</sup>	10.02±0.24 <sup>e</sup>	10.87±0.50 <sup>d</sup>	12.38±0.36 <sup>c</sup>	14.33±0.18 <sup>b</sup>	14.62±0.05 <sup>b</sup>	15.90±0.67 <sup>a</sup>	16.48±0.10 <sup>a</sup>				
12	5.71±0.24 <sup>f</sup>	9.81±0.34 <sup>e</sup>	10.28±0.32 <sup>de</sup>	11.03±0.37 <sup>d</sup>	12.77±0.49 <sup>c</sup>	13.84±0.28 <sup>b</sup>	16.09±0.87 <sup>a</sup>	16.07±0.46 <sup>a</sup>				
18	5.75±0.11 <sup>f</sup>	8.30±0.56 <sup>d</sup>	9.72±0.84 <sup>c</sup>	10.50±0.21 <sup>c</sup>	13.06±0.10 <sup>b</sup>	13.21±0.82 <sup>b</sup>	15.12±0.62 <sup>a</sup>	15.85±0.46 <sup>a</sup>				
24	5.99±0.30 <sup>f</sup>	7.88±0.44 <sup>c</sup>	9.21±0.80 <sup>d</sup>	10.44±0.61 <sup>c</sup>	11.02±0.54 <sup>c</sup>	13.02±0.70 <sup>b</sup>	14.55±0.37 <sup>a</sup>	15.22±0.68 <sup>a</sup>				

Note: Each value is the mean of triplicate ± SD.

The different superscripts in the row denote the significant differences ( $p \leq 0.05$ ).

All raw crackers were prepared by steaming the starch mixtures at 100°C for 25-120 min, followed by drying at 55-60°C for 3-4 h.

#### 4.3.2 สมบัติของข้าวเกรียบแป้งผสมหลังการทอด

นำข้าวเกรียบแป้งผสมที่เตรียมได้ตามบทที่ 3 จากการทดลองข้อ 3.4.3 อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 55-60°C โดยกำหนดให้มีความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วงร้อยละ 8-9 แล้วทอดในน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิประมาณ 190-200°C (โดยใช้น้ำมันปาล์ม 8 กิโลกรัมต่อข้าวเกรียบ 1,000 กรัม) เป็นระยะเวลา 25 วินาที ตั้งทิ้งไว้ให้สะเด็ดน้ำมันที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 นาที แล้วตรวจวิเคราะห์สมบัติของข้าวเกรียบแป้งผสมหลังการทอดเปรียบเทียบกับข้าวเกรียบชุดควบคุม (ข้าวเกรียบที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว) โดยสมบัติที่ศึกษา ได้แก่ อัตราการพองตัว (Expansion ratio) ลักษณะและจำนวนโพรงอากาศ (Air cell) และค่าแรงกดของเนื้อสัมผัส ผลการศึกษาเป็นดังนี้

##### 4.3.2.1 อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบแป้งผสมหลังทอด

การทอดข้าวเกรียบในน้ำมันที่อุณหภูมิสูงมีผลให้ความชื้นในข้าวเกรียบกลายเป็นไอน้ำและดันผ่านเนื้อข้าวเกรียบระเหยออกไปอย่างรวดเร็ว แรงดันไอน้ำที่เกิดขึ้นและการระเหยอย่างรวดเร็วนี้มีผลให้แผ่นข้าวเกรียบขยายตัวและเกิดโพรงอากาศ ซึ่งก็คือ ทำให้แผ่นข้าวเกรียบเกิดการพองตัวนั่นเอง จากการวัดอัตราการพองตัวโดยเปรียบเทียบขนาดของข้าวเกรียบหลังทอดกับก่อนการทอด พบว่าปริมาณแป้งสาकुและระยะเวลานึ่งมีผลต่ออัตราการพองตัวของข้าวเกรียบแป้งผสมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) อีกทั้งมีอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยดังกล่าวอีกด้วย (ตารางภาคผนวกที่ 9)

ปริมาณแป้งสาकुมีผลต่ออัตราการพองตัวของข้าวเกรียบแป้งผสมหลังทอดอย่างมีนัยสำคัญ โดยชุดการทดลองที่มีระยะเวลานึ่งเท่ากัน อัตราการพองตัวของชุดการทดลองที่มีแป้งสาکور้อยละ 0 (มีเฉพาะแป้งมันสำปะหลัง) มีอัตราการพองตัวสูงสุด ขณะที่ชุดการทดลองที่มีปริมาณแป้งสาकुสูงสุด (ร้อยละ 24) มีอัตราการพองตัวต่ำที่สุด และเมื่อปริมาณของแป้งสาकुเพิ่มขึ้นจะมีผลให้อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบมีแนวโน้มลดลง (ตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.15) โดยผลการทดลองเป็นไปในทำนองเดียวกันในทุกๆระยะเวลานึ่ง ทั้งนี้เหตุผลประการแรกน่าจะเป็นผลมาจากระดับการเกิดเจลลาตินเซชันของแป้งผสมลดลงเมื่อสัดส่วนแป้งสาकुเพิ่มขึ้น ซึ่งผลของระดับการเกิดเจลลาตินเซชันต่ออัตราการพองตัว ดังได้กล่าวแล้วข้างต้น แม้ว่าระดับการเกิดเจลลาตินเซชันของข้าวเกรียบแป้งผสมจะลดลงเมื่อปริมาณแป้งสาकुเพิ่มขึ้นแต่ส่วนใหญ่ก็ไม่มีผลแตกต่างทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) เหตุผลประการที่สองอาจเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณอะมิโลสในแป้งผสม (เนื่องจากแป้งสาकुมีปริมาณอะมิโลสสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง) มีผลให้เกิดการกลับมาเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลอะมิโลสในข้าวเกรียบหลังการนึ่ง หรือเกิดรีโทรเกรเดชันสูงขึ้น (ซึ่งสอดคล้องกับ

ค่าความหนืดสุดท้ายของแป้งเปียกที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ดังรูปที่ 4.7) มีผลให้โครงสร้างข้าวเกรียบมีความแข็งแรงมากขึ้นและเกิดการขยายตัวได้ยากในระหว่างการทอด อัตราการพองตัวจึงต่ำกว่าชุดการทดลองที่มีปริมาณแป้งสาคุ (ปริมาณอะมิโลส) ต่ำกว่า ผลการทดลองนี้ สอดคล้องกับการศึกษาของ Kyaw *et al.* (2001a) ซึ่งพบว่าเจลของข้าวเกรียบปลาที่ผลิตจากแป้งข้าวสาลี (ปริมาณอะมิโลสร้อยละ 25) เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นระยะเวลา 30 นาที ความแข็งแรงของเจลมีค่าสูง ส่งผลให้อัตราการพองตัวต่ำกว่าข้าวเกรียบปลาที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง (ปริมาณอะมิโลสร้อยละ 17)

ระยะเวลาการนึ่งมีผลต่ออัตราการพองตัวของข้าวเกรียบแป้งผสมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) (ตารางภาคผนวกที่ 9) โดยในชุดการทดลองที่สัดส่วนแป้งผสมเดียวกัน พบว่าข้าวเกรียบแป้งผสมทุกชุดการทดลองมีอัตราการพองตัวเพิ่มขึ้น ในช่วงระยะเวลานึ่งนาน 25-60 นาที พบว่าอัตราการพองตัวของข้าวเกรียบแป้งผสมที่ระยะเวลานึ่งนาน 60 นาที มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) กับชุดการทดลองที่ระยะเวลานึ่งต่ำกว่า 45 นาที ซึ่งข้าวเกรียบแป้งผสมที่มีปริมาณของแป้งสาคุร้อยละ 0-24 มีอัตราการพองตัวสูงสุดที่ระยะเวลานึ่งนาน 60 นาที โดยอัตราการพองตัวเฉลี่ยมีค่าเท่ากับร้อยละ 187.15-182.04 (ตารางที่ 4.11) แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลานึ่งนานขึ้นเป็น 75-120 นาที พบว่าอัตราการพองตัวของข้าวเกรียบแป้งผสมมีแนวโน้มลดลง โดยข้าวเกรียบในทุกสัดส่วนของแป้งผสมให้ผลในลักษณะเดียวกัน (รูปที่ 4.16) อัตราการพองของข้าวเกรียบอาจมีผลสืบเนื่องจากระดับการเกิดเจลลาติโนเซชันของแป้งจากผลการทดลองในตอนต้นที่ 4.3.1.3 ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว (ตารางที่ 4.8)

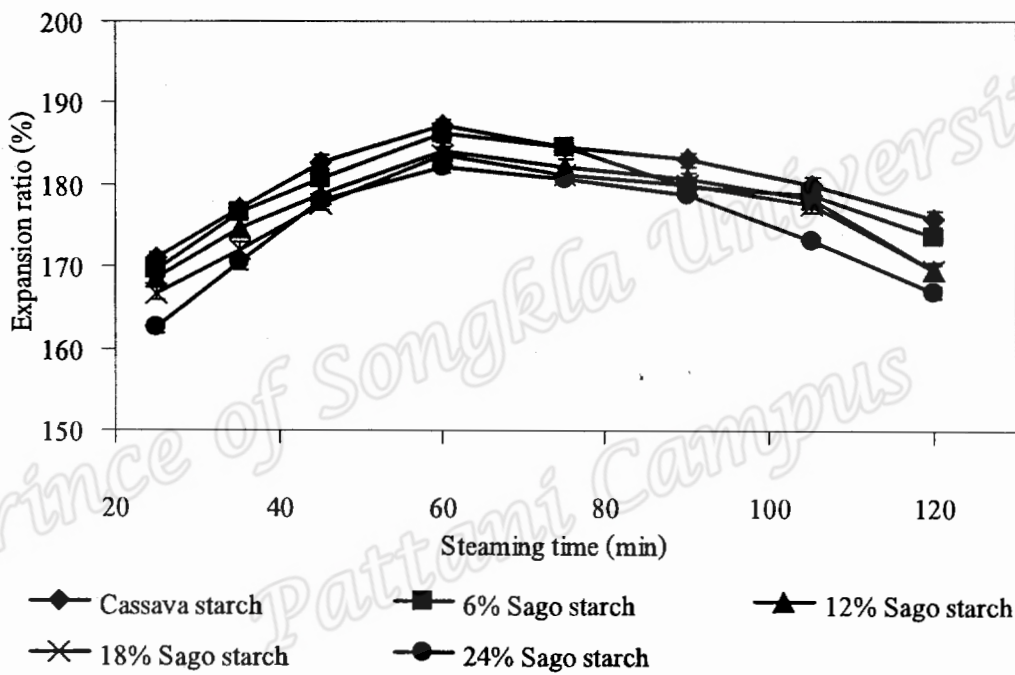
พิจารณาความสัมพันธ์ ระหว่างอัตราการพองตัวของข้าวเกรียบแป้งผสมหลังทอดกับระดับการเกิดเจลลาติโนเซชันของข้าวเกรียบแป้งผสมก่อนทอด (รูปที่ 4.17a, 4.17b) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงที่มีความสอดคล้องกันกับผลการทดลองตอนที่ 4.3.1.3 ดังที่กล่าวมาแล้วในตารางที่ 4.8 กล่าวคือ เมื่อระดับของการเกิดเจลลาติโนเซชันของข้าวเกรียบเพิ่มขึ้นเนื่องจากการให้ระยะเวลาการนึ่งนานขึ้น มีผลให้อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบแป้งผสมหลังมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ภายหลังเมื่อระยะเวลานึ่งนานขึ้นตั้งแต่ 60 นาที จนกระทั่งถึง 120 นาที ระดับของการเกิดเจลลาติโนเซชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่พบว่าในช่วงเวลาดังกล่าวระดับการเกิดเจลลาติโนเซชันไม่แตกต่างกัน ( $p > 0.05$ ) ขณะที่อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบมีแนวโน้มลดลง โดยข้าวเกรียบแป้งผสมทุกชุดการทดลองมีอัตราการพองตัวสูงสุดที่ระยะเวลานึ่งนาน 60 นาที ทั้งนี้การที่อัตราการพองตัวลดลงอาจเป็นเพราะการให้ระยะเวลานึ่งที่นาน มีผลให้โครงสร้างของแป้งถูกทำลายมากขึ้น ทำให้ข้าวเกรียบขยายตัวออกได้น้อยลง ดังนั้นระดับการเกิดเจลลาติโนเซชันของข้าวเกรียบก่อนทอดจึงมีผลต่ออัตราการพองตัวของข้าวเกรียบหลังทอด



Kyaw *et al.* (1999) และ Kyaw *et al.* (2000a) รายงานว่าอัตราการพองตัวของข้าวเกรียบจะมีค่าสูงสุด ณ จุดที่เม็ดแป้งมีการพองตัวเต็มที่ โดยในระหว่างการนึ่งโคข้าวเกรียบมีผลให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัว ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการเกิดเจลาตินในเซชันโดยโมเลกุลของน้ำที่ถูกจับยึดไว้ภายในโครงสร้างของเม็ดแป้งที่พองตัว เมื่อทอดข้าวเกรียบ น้ำเกิดการระเหยเป็นไอ แรงดันที่เกิดขึ้นสามารถดันให้แผ่นข้าวเกรียบมีการขยายตัวออก และอัตราการพองตัวของข้าวเกรียบปลาจะลดลง เมื่อให้ระยะเวลาหนึ่งนานกว่า 30 นาที ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากการให้ความร้อนเป็นระยะเวลานาน มีผลให้เม็ดแป้งที่พองตัวเต็มที่ที่มีการแตกตัวออกมากขึ้น ซึ่งการแตกหักของเม็ดแป้งเกิดจากการแยกออกจากกันของโครงสร้างร่างแหของอะมิโลส ทั้งนี้เมื่อให้ระยะเวลาหนึ่งนานๆ เม็ดแป้งเกิดการเจลาตินในเซชันอย่างต่อเนื่อง ทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งถูกทำลายมากขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างร่างแหมีความอ่อนแอกว่าและความสามารถในการจับกับโมเลกุลของน้ำลดน้อยลง ทำให้โมเลกุลของน้ำถูกปลดปล่อยออกจากโครงสร้างของเม็ดแป้ง เมื่อนำไปทอดแรงดันที่เกิดขึ้นจากการระเหยเป็นไอของน้ำในโครงสร้างของเม็ดแป้งอ่อนลง จึงอาจจะส่งผลให้ข้าวเกรียบมีอัตราการพองตัวน้อยลง ซึ่งการนึ่งก้อนโคของข้าวเกรียบในระยะเวลาที่สามารถทำให้เม็ดแป้งเกิดการเจลาตินในเซชันได้อย่างสมบูรณ์ และเม็ดแป้งพองตัวเต็มที่โดยที่ยังไม่แตกตัวออก จะมีผลให้อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบมีค่าสูง ดังนั้นในผลการทดลองนี้จึงอาจเป็นไปได้ว่าที่ระยะเวลานึ่งนาน 60 นาที เม็ดแป้งสามารถจับกับโมเลกุลของน้ำได้มากกว่าชุดการทดลองที่มีระยะเวลานึ่งน้อยกว่า แต่ที่ระยะเวลานึ่งนาน 75 นาทีขึ้นไป อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบลดลง อาจเนื่องมาจากที่เม็ดแป้งเกิดการแตกตัวมากขึ้น หากเม็ดแป้งจำนวนหนึ่งเกิดแตกตัวไม่สามารถอุ้มน้ำไว้ได้และโมเลกุลเกิดการแตกหักมากขึ้น (โดยพบว่าเมื่อระยะเวลาหนึ่งเพิ่มขึ้นดัชนีการดูดซับน้ำซึ่งบ่งบอกถึงการแตกหักของโมเลกุล มีค่าเพิ่มมากขึ้น) ทำให้เจลข้าวเกรียบไม่แข็งแรง ดังนั้นเมื่อได้รับความร้อน เกิดแรงดันไอน้ำ ดันเจลข้าวเกรียบได้โดยง่าย มีผลให้แผ่นเจลบาง ไม่มีความแข็งแรงที่จะอุ้มอากาศไว้ได้ ทำให้เกิดการยุบตัวของฟองอากาศบางส่วน ทำให้อัตราการพองตัวลดลง

นอกจากนี้ผลจากการทดลองพบว่าที่ระยะเวลานึ่งนานขึ้นและปริมาณแป้งสาकुเพิ่มขึ้น อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบแป้งผสมหลังทอดมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้แป้งสาकुมีปริมาณอะมิโลสสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง ปริมาณอะมิโลสอาจมีผลต่ออัตราการพองตัวของข้าวเกรียบ ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าความหนืดสุดท้ายภายหลังการลดลงอุณหภูมิลง พบว่าความหนืดของเจลแป้งสาकुมีค่าสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง ดังนั้นภายหลังวางทิ้งโคข้าวเกรียบไว้ให้เย็นลง ปริมาณอะมิโลสที่สูงในแป้งสาकुอาจมีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันสูงกว่าแป้งมันสำปะหลังที่มีโมเลกุลอะมิโลสต่ำกว่า โดยโมเลกุลอะมิโลสมีการจัดเรียงตัวกันใหม่ เกิดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงมากขึ้น จึงอาจส่งผลให้เจลสาकुจากแป้งสาकुมีลักษณะแข็งกว่าเจลสาकुจากแป้งมันสำปะหลัง ดังนั้นเจลที่แข็งแรงมากขึ้น

อาจจะมีผลให้ยากที่จะถูกดันให้ขยายตัวออกได้ง่าย ซึ่งเมื่อนำไปทอดก็มีผลให้การขยายตัวของแผ่นข้าวเกรียบเนื่องจากแรงดันไอก่อเกิดขึ้นน้อย อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบแป้งผสมจึงมีแนวโน้มลดลง ดังนั้นการให้ระยะเวลาที่นานขึ้น เมื่อปริมาณแป้งสาकुเพิ่มขึ้นก็ทำให้ปริมาณของอะมิโลสในข้าวเกรียบแป้งผสมเกิดการแตกหักและละลายออกมามากขึ้น จึงอาจส่งผลกระทบต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของอะมิโลส และอาจทำให้อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบหลังทอดมีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 4.16 อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบหลังทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาकुที่มีปริมาณแป้งสาकुเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

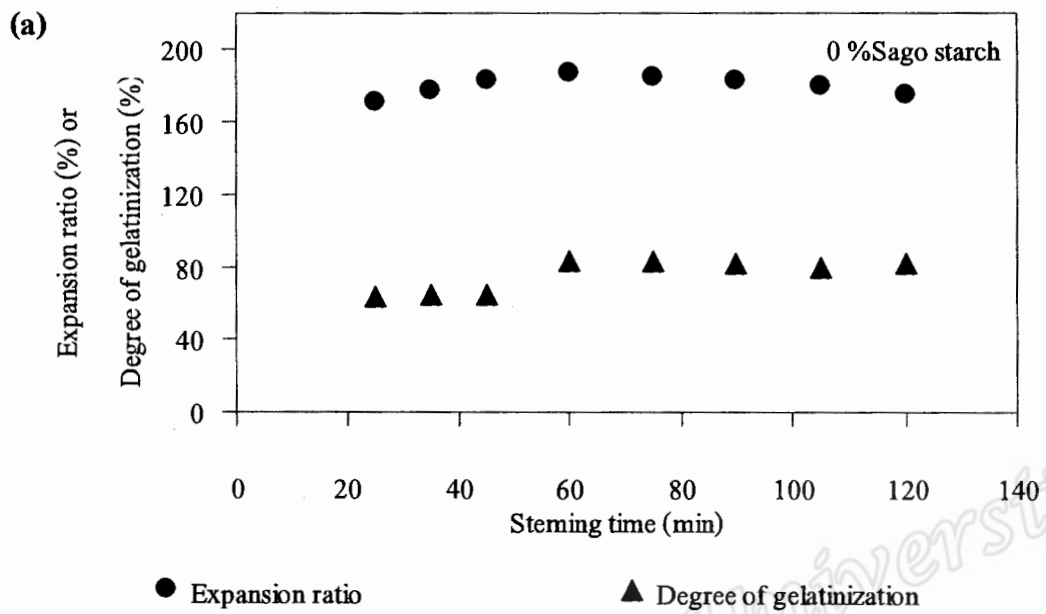
ตารางที่ 4.11 อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบหาลังทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับ ร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

Sago starch (%)	Expansion ratio (%)									
	25	35	45	60	75	90	105	120		
0 (Cassava starch)	171.09±0.73 <sup>e</sup>	177.14±0.67 <sup>e</sup>	182.69±0.93 <sup>e</sup>	187.15±0.67 <sup>a</sup>	184.61±0.47 <sup>b</sup>	182.99±0.82 <sup>c</sup>	180.05±0.79 <sup>d</sup>	175.80±0.91 <sup>f</sup>		
6	169.33±0.58 <sup>e</sup>	176.61±0.96 <sup>c</sup>	180.66±0.75 <sup>c</sup>	186.12±0.96 <sup>a</sup>	184.56±0.62 <sup>b</sup>	179.70±0.71 <sup>cd</sup>	178.82±0.71 <sup>d</sup>	173.66±0.73 <sup>f</sup>		
12	168.55±0.81 <sup>e</sup>	174.71±0.87 <sup>c</sup>	178.85±0.94 <sup>d</sup>	184.16±0.94 <sup>a</sup>	182.07±0.95 <sup>b</sup>	180.57±0.92 <sup>c</sup>	178.27±0.58 <sup>d</sup>	169.67±0.80 <sup>f</sup>		
18	166.64±0.63 <sup>e</sup>	171.99±0.93 <sup>c</sup>	177.54±0.75 <sup>d</sup>	183.66±0.89 <sup>a</sup>	181.15±0.37 <sup>b</sup>	179.97±0.30 <sup>c</sup>	177.47±0.91 <sup>d</sup>	169.66±0.74 <sup>f</sup>		
24	162.49±0.72 <sup>e</sup>	170.44±0.87 <sup>c</sup>	178.04±0.66 <sup>d</sup>	182.04±0.74 <sup>a</sup>	180.69±0.30 <sup>b</sup>	178.75±0.18 <sup>c</sup>	173.08±0.68 <sup>d</sup>	166.92±0.78 <sup>f</sup>		

Note: Each value is the mean of triplicate ± SD.

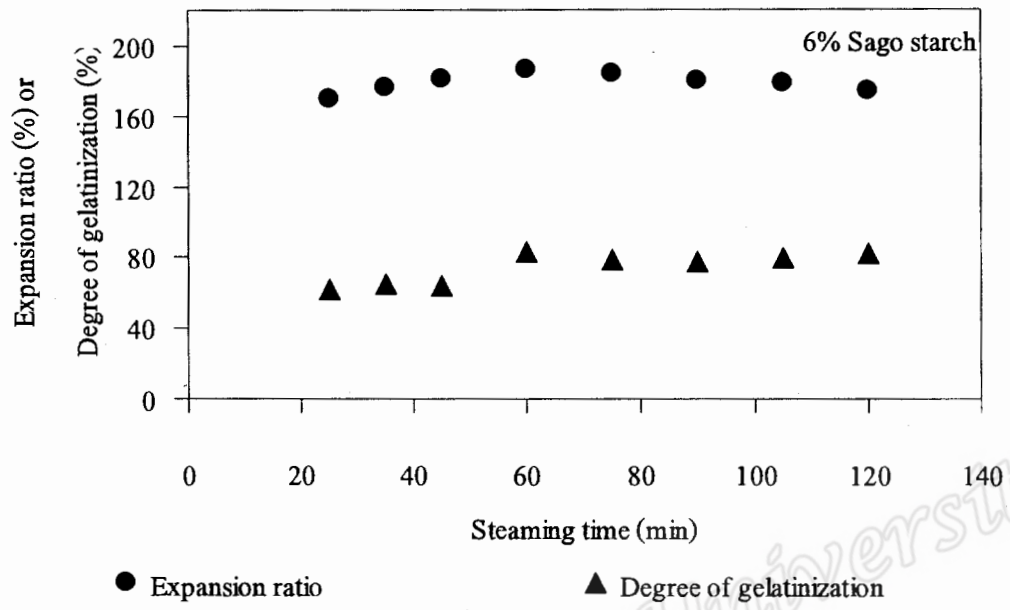
The different superscripts in the row denote the significant differences ( $p \leq 0.05$ ).

All fried crackers were prepared by steaming the starch mixtures at 100°C for 25-120 min, followed by drying at 55-60°C for 3-4 h and frying at 190-200°C for 25 sec.

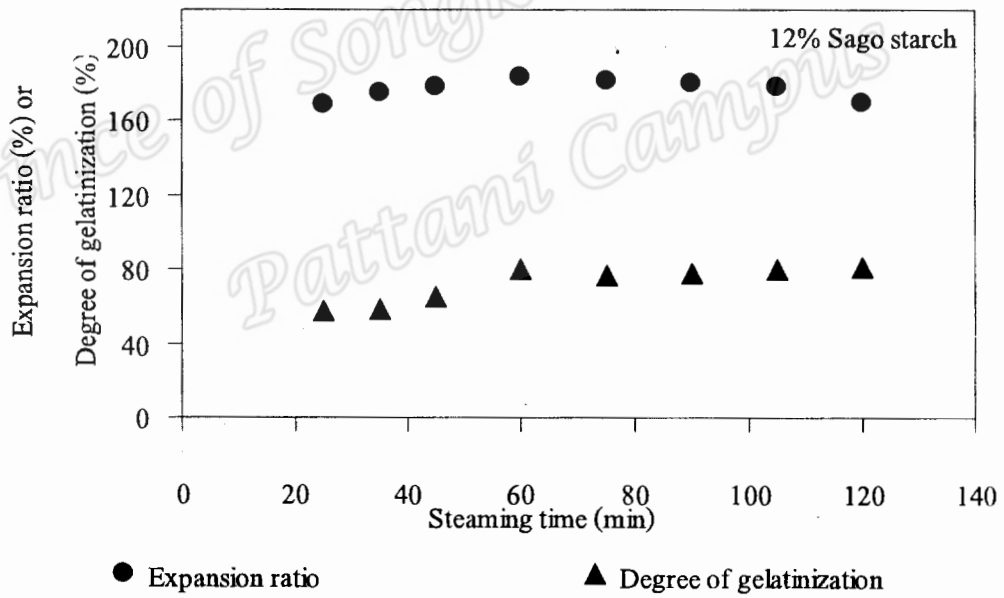


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการเกิดเจลลิตไนเซชันของแผ่นข้าวเกรียบที่ยังไม่ผ่านการทอดและอัตราการพองตัวของข้าวเกรียบหลังทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาอุที่มีปริมาณแป้งสาอุเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0 (a), 6 (b), 12 (c), 18 (d) และ 24 (e)

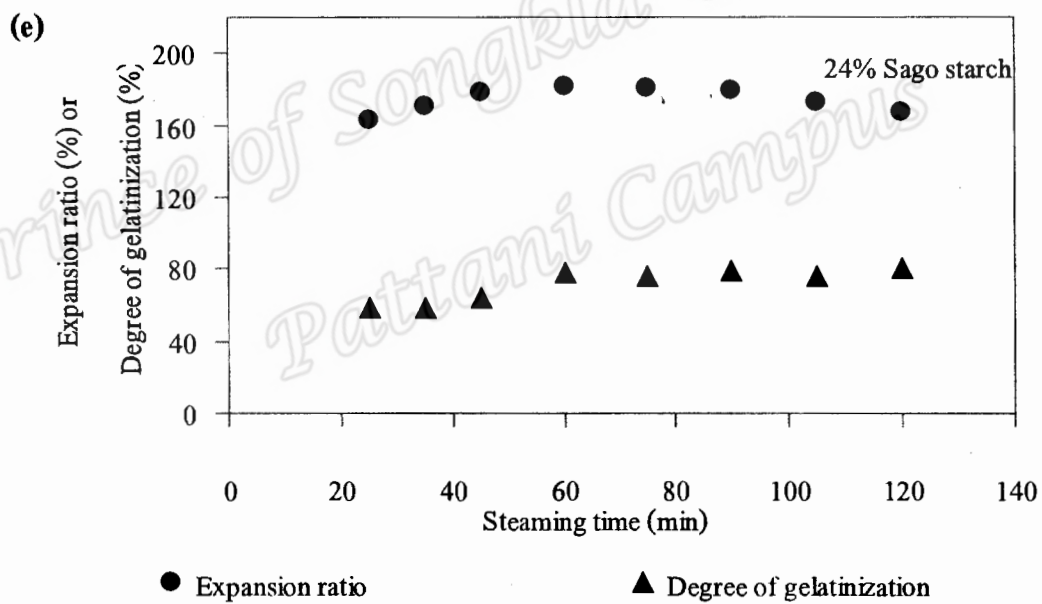
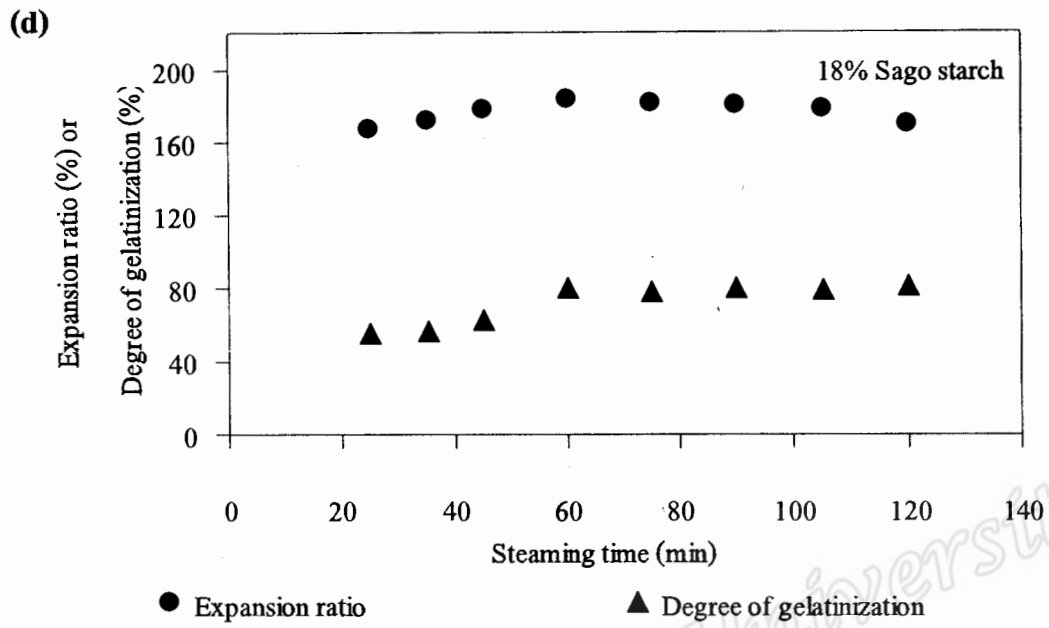
(b)



(c)



รูปที่ 17 (ต่อ)



รูปที่ 4.17 (ต่อ)

### 3.2.2 ลักษณะและจำนวนโพรงอากาศของข้าวเกรียบแป้งผสมหลังทอด

จากการตรวจสอบลักษณะโพรงอากาศของข้าวเกรียบทอด โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอที่กำลังขยาย 125 เท่า บันทึกภาพจากกล้องด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป นับจำนวนโพรงอากาศโดยปรับขยายภาพให้ใหญ่ขึ้น และมีขนาดพื้นที่เท่ากันทุกภาพ คือ 8x10 ตารางเซนติเมตร ผลการนับจำนวนโพรงอากาศบนพื้นที่ปรากฏได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.18 ลักษณะของโพรงอากาศของข้าวเกรียบหลังทอดที่บันทึกได้ แสดงดังรูปที่ 4.19a-4.19h ซึ่งมีลักษณะโปร่งใส ซึ่งลักษณะปรากฏดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อแผ่นข้าวเกรียบแห้งได้รับความร้อนสูงในระหว่างการทอดทำให้โมเลกุลของน้ำที่แทรกตัวในโครงสร้างของแผ่นข้าวเกรียบระเหยกลายเป็นไอขึ้นอย่างรวดเร็ว แรงดันไอดังกล่าวจะดันให้เนื้อแป้งสุกของข้าวเกรียบขยายตัวเกิดเป็นช่องว่างของโพรงอากาศขึ้น (Colonna *et al.*, 1989) ซึ่งลักษณะโพรงอากาศของข้าวเกรียบแป้งผสมในทุกชุดการทดลองมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ

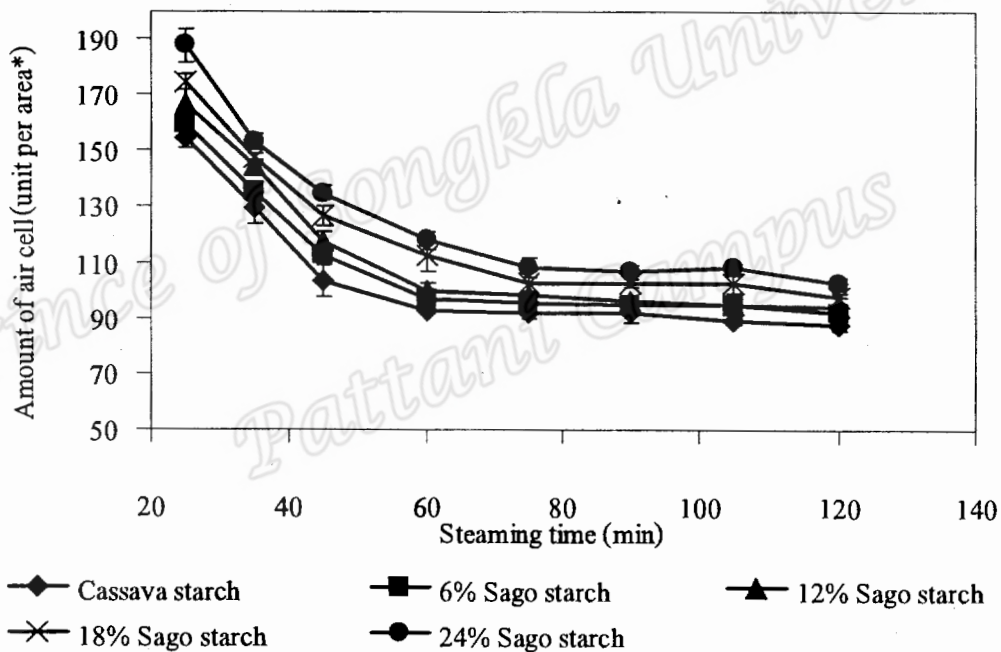
จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าปริมาณแป้งสาकुและระยะเวลาการนึ่งมีผลต่อจำนวนโพรงอากาศต่อพื้นที่ปรากฏของข้าวเกรียบทุกชุดการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) อีกทั้งมีอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยดังกล่าวอีกด้วย (ตารางภาคผนวกที่ 10)

ปริมาณแป้งสาकुมีผลต่อจำนวนโพรงอากาศต่อพื้นที่ปรากฏกล่าวคือเมื่อปริมาณแป้งสาकुเพิ่มขึ้น จำนวนโพรงอากาศเพิ่มขึ้น (แต่มีขนาดของโพรงอากาศเล็กลง) ซึ่งผลการทดลองเป็นไปในทำนองเดียวกันในทุกระยะเวลาหนึ่ง ทั้งนี้อาจเนื่องจากเหตุผลเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงอัตราการพองตัว ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น นั่นคือปริมาณแป้งสาकुในแป้งผสมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เจลของข้าวเกรียบแข็งแรงขึ้น แรงดันไอสสามารถดันให้เจลการขยายตัวได้น้อยทำให้และเกิดโพรงอากาศเพียงขนาดเล็กจำนวนมาก เมื่อเปรียบเทียบจำนวนโพรงอากาศต่อพื้นที่ที่เท่ากันจำนวนโพรงอากาศที่มีขนาดเล็กย่อมมากกว่านั่นเอง

ระยะเวลาหนึ่งมีผลต่อจำนวนโพรงอากาศต่อพื้นที่ปรากฏอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) กล่าวคือเมื่อระยะเวลาหนึ่งเพิ่มขึ้นมีผลให้จำนวนโพรงอากาศลดลง (แต่มีขนาดใหญ่ขึ้น) และผลการทดลองเป็นไปในทำนองเดียวกันในข้าวเกรียบแป้งผสมทุกสัดส่วน อย่างไรก็ตามพบว่าชุดการทดลองที่ระยะเวลานึ่งนาน 60-120 นาที มีจำนวนของโพรงอากาศต่อพื้นที่ปรากฏไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงอัตราการพองตัวของข้าวเกรียบหลังทอด ซึ่งอาจเป็นผลต่อเนื่องจากระดับการเกิดเจลลิตินในเซชันของเจลข้าวเกรียบที่ผ่านการนึ่ง เช่นเดียวกัน ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้อ 3.1.3 นอกจากนี้จะเห็นว่าชุดการทดลองที่ระยะเวลานึ่งนาน 60 นาที เป็นชุดการทดลองที่ให้จำนวนโพรงอากาศน้อยกว่าและแตกต่างทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) จากชุดการทดลองที่ระยะเวลานึ่งนาน 45 นาที แต่ไม่มีความแตกต่างจากชุดการ

ทดลองที่มีระแะเวลานึ่งที่นานกว่า คือ 75-120 นาที ซึ่งจำนวนโพรงอากาศมีแนวโน้มลดลง การนึ่งเป็นระยะเวลาานมากกว่า 60 นาที มีผลให้โครงสร้างของแป้งถูกทำลายมากขึ้น ความแข็งแรงของเจลข้าวเกรียบลดลงเมื่อถูกคั้นด้วยแรงคั้นไอน้ำเกิดโพรงอากาศที่มีผนังไม่แข็งแรงและเกิดการฉีกขาดได้ง่ายมีผลให้โพรงอากาศเกิดการรวมตัวกันและขยายขนาดใหญ่ขึ้น

จากผลการทดลองจะเห็นว่าลักษณะและจำนวนโพรงอากาศในข้าวเกรียบสอดคล้องกับอัตราการพองตัวของข้าวเกรียบดังที่ได้อธิบายในข้อ 4.3.2.1 กล่าวคือเมื่อนำขนาดของโพรงอากาศขยายใหญ่ (มีจำนวนลดลง) จะส่งผลให้อัตราการพองของข้าวเกรียบเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจมีผลสืบเนื่องจากระดับการเกิดเจลลาตินในเซชันของแป้งที่มีอิทธิพลต่ออัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูปเมื่อทอดในน้ำมันร้อน โดยการเกิดเจลลาตินในเซชันที่ไม่สมบูรณ์ของแป้งมีผลให้อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบลดลง (Mohamed *et al.*, 1989)



รูปที่ 4.18 จำนวนโพรงอากาศของข้าวเกรียบหลังทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาอุที่มีปริมาณแป้งสาอุเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

\* พื้นที่ภายใต้กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอเท่ากับ 8x10 ตารางเซนติเมตร



**ตารางที่ 4.12** จำนวนโพรงอากาศของข้าวเกรียบหลังทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

Sago starch (%)	Amounts of air cell (unit per area) *									
	Steaming time (min)									
	25	35	45	60	75	90	105	120		
0% (cassava starch)	154.67±4.04 <sup>a</sup>	129.67±6.03 <sup>b</sup>	103.33±5.51 <sup>c</sup>	92.33±0.58 <sup>d</sup>	91.67±2.08 <sup>d</sup>	92.00±3.61 <sup>d</sup>	89.33±1.53 <sup>d</sup>	87.30±2.08 <sup>d</sup>		
6% Sago starch	159.33±1.53 <sup>a</sup>	135.00±3.00 <sup>b</sup>	112.33±2.52 <sup>c</sup>	96.67±0.58 <sup>d</sup>	95.67±0.58 <sup>de</sup>	95.00±3.00 <sup>de</sup>	94.67±3.514 <sup>de</sup>	91.67±1.53 <sup>e</sup>		
12% Sago starch	166.67±4.93 <sup>a</sup>	144.33±2.31 <sup>b</sup>	117.33±3.51 <sup>c</sup>	100.00±2.65 <sup>d</sup>	98.33±1.53 <sup>de</sup>	96.33±1.53 <sup>de</sup>	94.67±0.58 <sup>de</sup>	94.33±3.51 <sup>e</sup>		
18% Sago starch	174.33±3.06 <sup>a</sup>	147.33±1.15 <sup>b</sup>	126.67±3.79 <sup>c</sup>	112.67±5.51 <sup>d</sup>	102.33±4.73 <sup>c</sup>	102.67±1.53 <sup>c</sup>	102.33±3.06 <sup>c</sup>	97.33±1.53 <sup>c</sup>		
24% Sago starch	187.67±6.03 <sup>a</sup>	153.00±3.00 <sup>b</sup>	134.67±2.52 <sup>c</sup>	118.00±3.00 <sup>d</sup>	108.00±3.61 <sup>c</sup>	106.67±2.52 <sup>c</sup>	108.00±2.00 <sup>c</sup>	102.67±2.31 <sup>c</sup>		

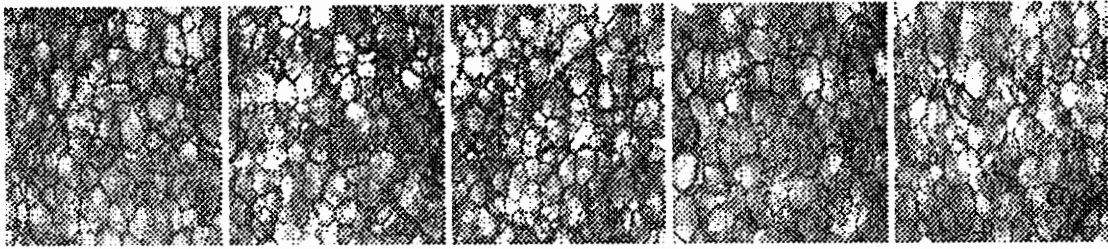
Note: Each value is the mean of triplicate ± SD.

The different superscripts in the row denote the significant differences ( $p \leq 0.05$ ).

Note: All crackers were prepared by steaming the starch mixtures at 100°C for 25-120 min, followed by drying at 55-60°C for 3-4 h and frying at 190-200°C for 25 sec.

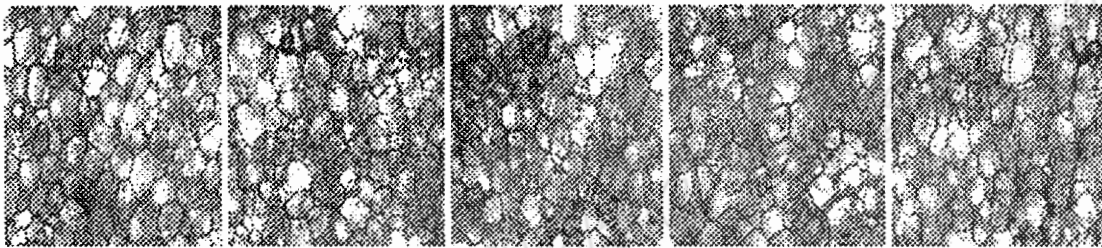
\* Area under stereo microscope is 8x10 cm<sup>2</sup>

**(a) Steaming time for 25 min**



Cassava starch    6% Sago starch    12% Sago starch    18% Sago starch    24% Sago starch

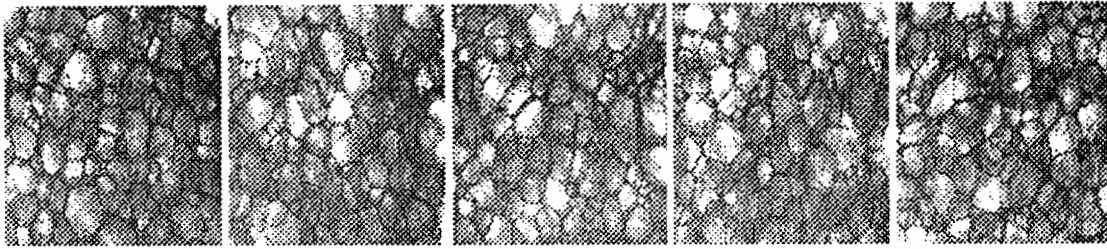
**(b) Steaming time for 35 min**



Cassava starch    6% Sago starch    12% Sago starch    18% Sago starch    24% Sago starch

รูปที่ 4.19 ลักษณะโพรงอากาศของข้าวเกรียบหลังทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาอูที่มีปริมาณแป้งสาอูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24 ภายหลังจากการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  ระยะเวลา 25 นาที (a), 35 นาที (b), 45 นาที (c), 60 นาที (d), 75 นาที (e), 90 นาที (f), 105 นาที (g) และ 120 นาที ภายใต้อุณหภูมิทอดแบบสเตอริโอที่กำลังขยาย 125 เท่า ภายใต้อินพุตที่  $8 \times 10$  ตารางเซนติเมตร

**(c) Steaming time for 45 min**



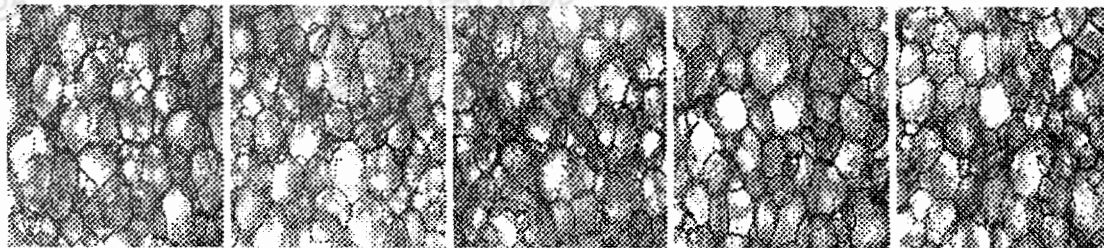
Cassava starch    6% Sago starch    12% Sago starch    18% Sago starch    24% Sago starch

**(d) Steaming time for 60 min**



Cassava starch    6% Sago starch    12% Sago starch    18% Sago starch    24% Sago starch

**(e) Steaming time for 75 min**



Cassava starch    6% Sago starch    12% Sago starch    18% Sago starch    24% Sago starch

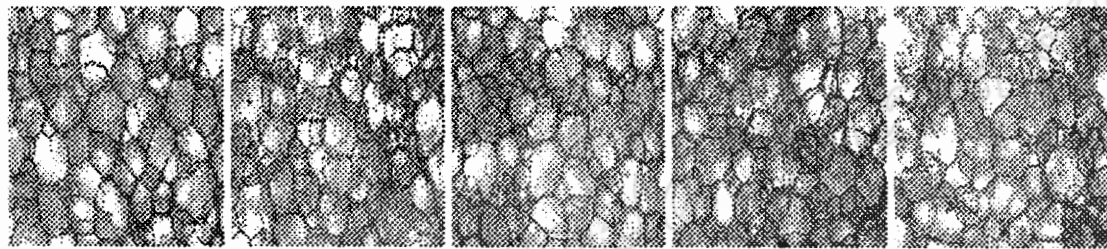
รูปที่ 4.19 (ต่อ)

**(f) Steaming time for 90 min**



Cassava starch    6% Sago starch    12% Sago starch    18% Sago starch    24% Sago starch

**(g) Steaming time for 105 min**



Cassava starch    6% Sago starch    12% Sago starch    18% Sago starch    24% Sago starch

**(h) Steaming time for 120 min**



Cassava starch    6% Sago starch    12% Sago starch    18% Sago starch    24% Sago starch

รูปที่ 4.19 (ต่อ)

#### 4.3.2.3 ค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบแป้งผสมหลังทอด

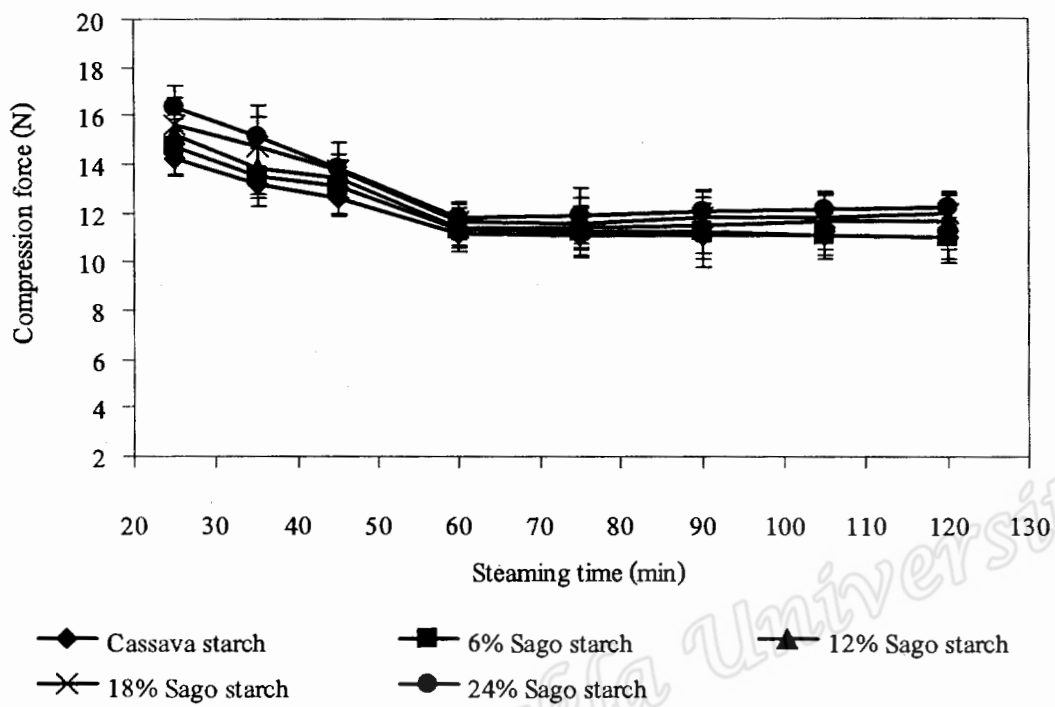
จากผลการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Texture analyzer ของข้าวเกรียบแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาธูภายหลังการทอดที่มีปริมาณของแป้งสาธูและระยะเวลาหนึ่งแตกต่างกัน โดยวัดค่าแรงกด (Compression force) พบว่าปริมาณของแป้งสาธูและระยะเวลาหนึ่งมีผลต่อค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) (ตารางภาคผนวกที่ 11) แต่ไม่มีอิทธิพลร่วมกันระหว่างทั้ง 2 ปัจจัยนี้ ( $p > 0.05$ )

เมื่อปริมาณแป้งสาธูในข้าวเกรียบแป้งผสมเพิ่มขึ้น (ในทุกชุดการทดลองที่ระยะเวลาหนึ่งเท่ากัน ทุกระยะเวลาหนึ่ง) มีผลให้ค่าแรงกดของข้าวเกรียบแป้งผสมมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยพบว่าข้าวเกรียบจากแป้งมันสำปะหลัง (มีแป้งสาธูร้อยละ 0) มีค่าแรงกดน้อยที่สุด ขณะที่ข้าวเกรียบแป้งผสมที่มีปริมาณแป้งสาธูร้อยละ 24 มีค่าแรงกดสูงที่สุด (รูปที่ 4.20) ซึ่งแสดงถึงว่าข้าวเกรียบจากแป้งมันสำปะหลังมีความกรอบมากที่สุด ทำให้ใช้แรงกดน้อยในการทำให้เกิดการแตกหัก

ระยะเวลาการหนึ่งของข้าวเกรียบมีผลต่อค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) ดังตารางภาคผนวกที่ 11 โดยในชุดการทดลองที่มีแป้งผสมสัดส่วนเดียวกันที่ระยะเวลาหนึ่งนาน 25-60 นาที แรงกดมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) ในทุกชุดการทดลอง และพบว่าในช่วงระยะเวลาหนึ่งนาน 60-120 นาที ค่าแรงกดเฉลี่ยของข้าวเกรียบแป้งผสมหลังทอดไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ดังตารางที่ 4.13 ดังนั้นระยะเวลาหนึ่งนาน 60 นาที จึงเป็นระยะเวลาที่น้อยที่สุดที่ให้ข้าวเกรียบที่มีค่าแรงกดไม่แตกต่างจากชุดการทดลองที่มีระยะเวลาหนึ่งสูงกว่า ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับอัตราการขยายตัวและลักษณะของโพรงอากาศดังได้กล่าวแล้วข้างต้น โพรงอากาศขนาดเล็กจำนวนมากมีหน้าที่ห่อหุ้มหนาและมีจำนวนมากเช่นกัน ต้องใช้แรงสูงในการกดทะลุ ซึ่งตรงกันข้ามกับโพรงอากาศขนาดใหญ่ อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับค่าแรงกด ข้าวเกรียบที่มีอัตราการพองตัวสูง มีผลให้โมเลกุลของแป้งที่ล้อมรอบช่องโพรงอากาศมีความหนาแน่นน้อย ข้าวเกรียบจึงแตกหักได้ง่าย (Mohamed *et al.*, 1988) ค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสที่วัดได้มีค่าน้อย ทำให้ข้าวเกรียบมีค่าความกรอบเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าผลการทดลองที่ได้นี้ อาจจะเป็นผลสืบเนื่องมาจากระดับการเกิดเจลลิตินในเซชันและการเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวเกรียบ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณอะมิโลสในแป้งผสม เนื่องจากแป้งสาธูมีปริมาณอะมิโลสสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง มีผลให้เกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลในเจลของโคข้าวเกรียบหลังการทำให้เย็นลง มีผลให้โครงสร้างเจลของโคข้าวเกรียบมีความแข็งแรงมากขึ้นและเกิดการขยายตัวได้ยากในระหว่างการทอด อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบแป้งผสมจึงลดลง เนื่องจากเกิดโพรงอากาศขนาดเล็กและมี

จำนวนเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของแป้งสาตุเพิ่มขึ้น ดังนั้น โพรงอากาศขนาดเล็กที่เป็นผลเนื่องจากการเพิ่มปริมาณแป้งสาตุในแป้งมันสำปะหลัง อาจส่งผลให้เกิดความสม่ำเสมอของโพรงอากาศในแผ่นข้าวเกรียบแป้งผสมภายหลังการทอด ซึ่งการจัดเรียงตัวอย่างสม่ำเสมอของโพรงอากาศจะมีผลให้เสริมความแข็งแรงของโพรงอากาศเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบแป้งผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของแป้งสาตุเพิ่มขึ้น ผลึกภัณฑ์ที่ได้จึงมีลักษณะกรอบแข็ง ขณะที่ข้าวเกรียบแป้งมันสำปะหลังมีอัตราการพองตัวสูงและลักษณะโพรงอากาศมีขนาดใหญ่ ดังนั้นแผ่นข้าวเกรียบจากแป้งมันสำปะหลังจะมีพื้นที่ที่เป็นช่องว่างมากทำให้ข้าวเกรียบมีความหนาแน่นต่ำและโพรงอากาศไม่แข็งแรง ข้าวเกรียบจากแป้งมันสำปะหลังจึงแตกหักได้ง่าย ผลึกภัณฑ์จึงมีลักษณะกรอบแต่เปราะ ส่งผลให้ค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบจากแป้งมันสำปะหลังมีค่าน้อยกว่า

จากการศึกษาของเทวี ทองแดง (2545) รายงานว่าปริมาณอะมิโลสมีผลต่อค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์ข้าวพอง โดยค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสผลิตภัณฑ์ข้าวพองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอะมิโลสสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอะมิโลสมีผลต่อการพองตัวของผลิตภัณฑ์ข้าวพอง ซึ่งข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ ปริมาตรของการพองตัวสูง ทำให้มีช่องว่างภายในเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการแตกหักได้ง่าย เมื่อมีแรงมากระทำ และจากรายงานของ รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต (2543) กล่าวว่าขนมขบเคี้ยวจากข้าวเหนียว กช 6 มีความพองตัวมากกว่าขนมขบเคี้ยวจากข้าวเจ้า เนื่องจากมีปริมาณของอะมิโลสต่ำมากทำให้การเกิดเจลลาติในเซชันเกิดขึ้นได้เร็วและสมบูรณ์มากกว่า รวมทั้งมีผลให้อัตราการรีโพรเกรเดชันต่ำกว่า จึงทำให้ขนมขบเคี้ยวจากข้าวเหนียวมีค่าความแข็งที่น้อยกว่าขนมขบเคี้ยวจากข้าวเจ้า เช่นเดียวกับการศึกษาของ Kyaw *et al.* (2001a) พบว่าที่อุณหภูมิการนึ่ง  $100^{\circ}\text{C}$  และระยะเวลาหนึ่งเท่ากัน ข้าวเกรียบปลาที่ผลิตจากแป้งข้าวสาตุมีค่าแรงกด (compressive strength) มากกว่าข้าวเกรียบปลาจากแป้งมันสำปะหลัง ทั้งนี้เนื่องจากแป้งข้าวสาตุมีปริมาณอะมิโลสอยู่ร้อยละ 25 ซึ่งมากกว่าแป้งมันสำปะหลังที่มีอะมิโลสอยู่ร้อยละ 17 ส่งผลให้แป้งสาตุที่ผ่านการทำให้สุก จะมีเจลลักษณะแข็งกว่าแป้งมันสำปะหลัง



รูปที่ 4.20 ค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบหลังทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาตุที่มีปริมาณแป้งสาตุเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

ตารางที่ 4.13 ค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบหึ่งทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

Sago starch (%)	Compression force (N)									
	Steaming time (min)									
	25	35	45	60	75	90	105	120		
0 (Cassava starch)	14.21±0.59 <sup>a</sup>	13.18±0.56 <sup>b</sup>	12.63±0.78 <sup>b</sup>	11.20±0.76 <sup>c</sup>	11.09±0.92 <sup>c</sup>	11.12±1.29 <sup>c</sup>	11.05±0.96 <sup>c</sup>	10.98±0.87 <sup>c</sup>		
6	14.72±1.18 <sup>a</sup>	13.49±1.18 <sup>b</sup>	13.08±1.09 <sup>b</sup>	11.33±0.66 <sup>c</sup>	11.27±0.97 <sup>c</sup>	11.25±1.16 <sup>c</sup>	11.10±0.85 <sup>c</sup>	11.02±1.11 <sup>c</sup>		
12	15.23±0.81 <sup>a</sup>	13.87±1.09 <sup>b</sup>	13.45±0.93 <sup>b</sup>	11.43±0.83 <sup>c</sup>	11.45±0.89 <sup>c</sup>	11.46±1.13 <sup>c</sup>	11.63±1.14 <sup>c</sup>	11.66±1.13 <sup>c</sup>		
18	15.61±1.15 <sup>a</sup>	14.73±1.20 <sup>a</sup>	13.75±1.18 <sup>b</sup>	11.64±0.73 <sup>c</sup>	11.58±1.04 <sup>c</sup>	11.83±1.03 <sup>c</sup>	11.81±0.89 <sup>c</sup>	11.95±0.72 <sup>c</sup>		
24	16.32±0.91 <sup>a</sup>	15.14±1.29 <sup>b</sup>	13.86±1.00 <sup>b</sup>	11.80±0.63 <sup>d</sup>	11.87±1.14 <sup>d</sup>	12.07±0.85 <sup>d</sup>	12.13±0.71 <sup>d</sup>	12.19±0.72 <sup>d</sup>		

Note: Each value is the mean of ten determinations ± SD.

The different superscripts in the row denote the significant differences ( $p \leq 0.05$ ).

All fried crackers were prepared by steaming the starch mixtures at 100 °C for 25-120 min, followed by drying at 55-60 °C for 3-4 h and frying at 190-200 °C for 25 sec.



#### 4.4. ผลการเก็บรักษาต่อคุณภาพของข้าวเกรียบแป้งผสมหลังการทอด

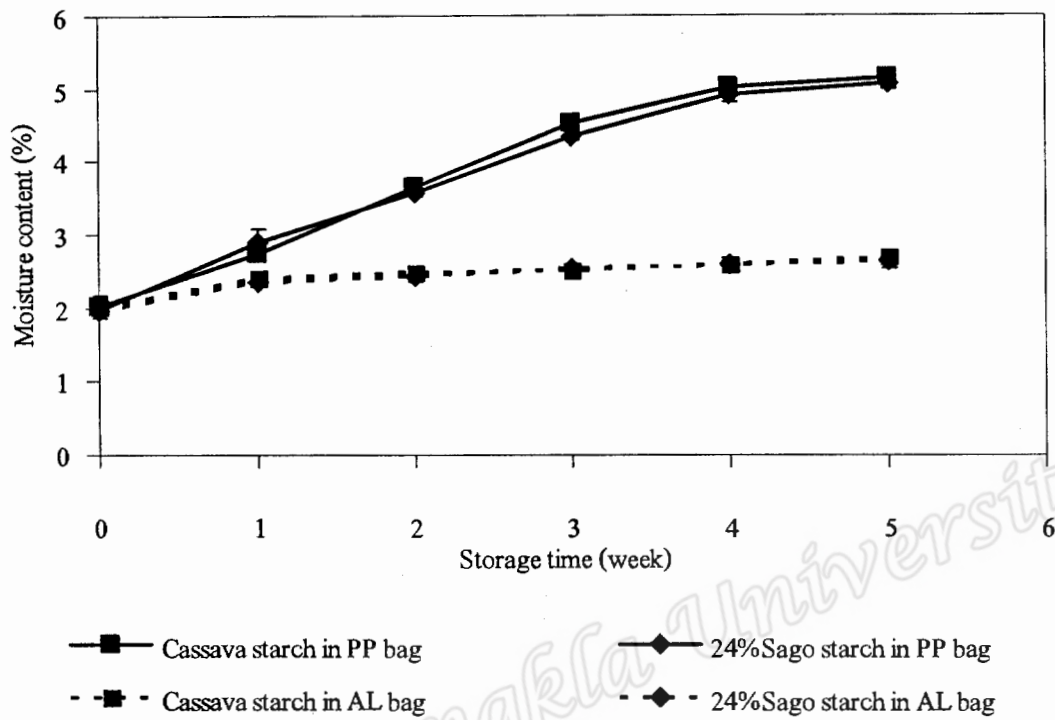
จากการทดลองในข้อ 4.3 ได้คัดเลือกข้าวเกรียบแป้งผสมที่มีปริมาณแป้งสาคร้อยละ 0 และ 24 และระยะเวลาหนึ่งนาน 60 นาที เพื่อเป็นตัวแทนตัวอย่างในการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของข้าวเกรียบแป้งผสมภายหลังทอดในระหว่างการเก็บรักษา โดยพิจารณาจากระดับของการเกิด เกลาติในเซชันของข้าวเกรียบแป้งผสมในการทดลองข้อ 3.1 อัตราการพองตัวและลักษณะเนื้อสัมผัสในการทดลองข้อ 3.2 โดยที่พบว่าข้าวเกรียบแป้งผสมชุดการทดลองที่ระยะเวลาหนึ่ง 60 นาที ให้ผลแตกต่างจากระยะเวลาหนึ่ง 45 นาที อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) แต่ไม่แตกต่างจากชุดการทดลองที่ใช้ระยะเวลาหนึ่งสูงกว่า ดังนั้นจึงเป็นระยะเวลาหนึ่งที่สั้นที่สุดที่ทำให้ผลไม่ต่างจากระยะเวลาหนึ่งที่นานกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของแป้งสาคร ดังนั้นจึงเลือกชุดการทดลองที่มีปริมาณแป้งสาคร้อยละ 24 (ชุดการทดลองที่ใช้แป้งสาครในปริมาณสูงสุด) เปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่มีแป้งสาคร โดยใช้บรรจุภัณฑ์ 2 ชนิด คือถุงโพลีโพรพิลีน (PP) และถุงอะลูมิเนียมลามิเนต (AL) แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลานาน 5 สัปดาห์ และสุ่มตัวอย่างมาตรวจวิเคราะห์คุณภาพของข้าวเกรียบแป้งผสม ได้แก่ ค่าความชื้น ค่าแรงกดของเนื้อสัมผัส และค่า TBARS ในแต่ละสัปดาห์ ได้ผลดังนี้

##### 4.4.1 ปริมาณความชื้น

ผลการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของข้าวเกรียบจากแป้งมันสำปะหลังและข้าวเกรียบแป้งผสมที่มีปริมาณแป้งสาคร้อยละ 24 ในระหว่างการเก็บรักษานาน 5 สัปดาห์ (รูปที่ 4.21) พบว่าชนิดของบรรจุภัณฑ์และระยะเวลาการเก็บรักษามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของข้าวเกรียบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) ดังตารางภาคผนวกที่ 12 แต่ชนิดของแป้งไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น ( $p > 0.05$ ) ดังตารางภาคผนวกที่ 12 อีกทั้งไม่มีอิทธิพลร่วมกันระหว่างทั้ง 3 ปัจจัยนี้ กล่าวคือ ปริมาณความชื้นของข้าวเกรียบในทุกชุดการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น โดยอัตราการเพิ่มค่าความชื้นของข้าวเกรียบทั้ง 2 ชนิด ที่บรรจุในถุงโพลีโพรพิลีนสูงกว่าข้าวเกรียบที่บรรจุในถุงอะลูมิเนียมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) ดังตารางภาคผนวกที่ 12 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะถุงโพลีโพรพิลีนมีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (0.7 กรัม/ตรม./วัน) สูงกว่าถุงอะลูมิเนียมลามิเนต (0.1 กรัม/ตรม./วัน) ส่งผลให้ค่าความชื้นของข้าวเกรียบที่บรรจุในถุงโพลีโพรพิลีนมีค่าสูงกว่าข้าวเกรียบที่บรรจุในถุงอะลูมิเนียมภายหลังการเก็บรักษานาน 5 สัปดาห์

แป้งสาคูไม่มีส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นของข้าวเกรียบตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ดังตารางภาคผนวกที่ 12 ซึ่งข้าวเกรียบทุกชุดการทดลองที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ชนิดเดียวกันและระยะเวลาการเก็บรักษาที่สัปดาห์เดียวกันมีปริมาณความชื้นไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น โดยข้าวเกรียบแป้งมันสำปะหลังและข้าวเกรียบแป้งผสมที่ปริมาณแป้งสาคูร้อยละ 24 ที่บรรจุในถุงโพลีโพรพิลีนและถุงอะลูมิเนียมลามิเนตมีค่าความชื้นเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 5.14, 5.08 และ 2.68, 2.63 ตามลำดับ ภายหลังระยะเวลาการเก็บรักษานาน 5 สัปดาห์

ผลจากการทดลองมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ ณัฐนันท์ ชุมแก้ว (2543) ซึ่งกล่าวว่าผลิตภัณฑ์ข้าวพองเสริมใยอาหารจะมีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับรายงานของ วิภาดา ชัยจะโปะ (2542) กล่าวว่าระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานขึ้นมีผลให้ผลิตภัณฑ์แครกเกอร์ปลาทูน่ามีความชื้นเพิ่มขึ้น และจากรายงานของ รณิคนิวิเชียร (2541) ที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขบเคี้ยวจากปลาตาโตในระหว่างการเก็บรักษา พบว่าการเก็บผลิตภัณฑ์ในบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกันมีผลต่อปริมาณความชื้น โดยผลิตภัณฑ์ขบเคี้ยวที่บรรจุในถุงโพลีโพรพิลีนมีปริมาณความชื้นสูงกว่าในถุงโอเรียลเต็ด โพลีโพรพิลีนตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ทั้งนี้เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีความชื้นในระดับต่ำกว่าความชื้นในบรรยากาศ ทำให้มีโอกาสที่ดูดความชื้นจากรอบข้างได้ง่าย (Labuza, 1982) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าบรรจุภัณฑ์ในการบรรจุมีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น ซึ่งการเก็บในบรรจุภัณฑ์ที่สามารถป้องกันความชื้นของไอน้ำได้ดีกว่า มีผลให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความชื้นในผลิตภัณฑ์นั้นมีค่าน้อยกว่า



รูปที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของข้าวเกรียบหลังทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาตุที่มีปริมาณแป้งสาตุเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0 และ 24 ภายหลังจากการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  ระยะเวลา 60 นาที ในถุงโพลีโพรพิลีนและถุงอะลูมิเนียมเหนียวลามิเนต ระหว่างการเก็บรักษา 5 สัปดาห์

#### 4.4.2 ค่าแรงกดของเนื้อสัมผัส

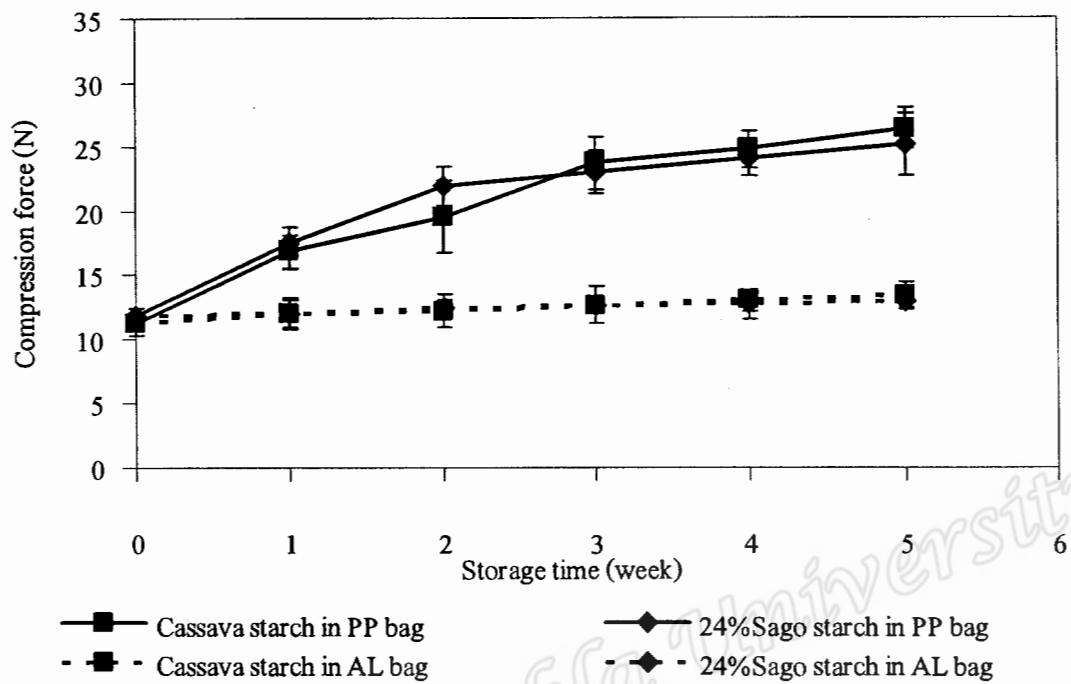
จากการวิเคราะห์ค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบ โดยใช้เครื่อง Texture analyzer ในระหว่างการเก็บรักษา พบว่าชนิดของบรรจุภัณฑ์ และระยะเวลาการเก็บรักษามีผลต่อค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) ขณะที่ชนิดของแป้งไม่มีผลต่อค่าแรงกดของเนื้อสัมผัส ( $p > 0.05$ ) ดังตารางภาคผนวกที่ 13 และไม่มีอิทธิพลร่วมกันระหว่างทั้ง 3 ปัจจัยนี้ ( $p > 0.05$ ) แต่อย่างไรก็ตามพบว่าค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบในทุกชุดการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเก็บรักษาที่นานขึ้น (รูปที่ 4.22)

โดยข้าวเกรียบชนิดเดียวกันที่บรรจุในถุงโพลีโพรพิลีนมีการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงกดสูงกว่าข้าวเกรียบที่บรรจุในถุงอะลูมิเนียมลามิเนตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) ซึ่งให้ผลทำนองเดียวกันในข้าวเกรียบทั้ง 2 ชนิด ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา โดยค่าแรงกดของข้าวเกรียบที่บรรจุในถุงโพลีโพรพิลีนมีค่าแตกต่างจากค่าแรงกดในสัปดาห์ที่ 0 ตั้งแต่สัปดาห์ที่ 1 ขณะที่ค่าแรงกดของข้าวเกรียบที่บรรจุในถุงอะลูมิเนียมลามิเนตมีค่าแรงกดแตกต่างกับสัปดาห์ที่ 0 ตั้งแต่สัปดาห์ที่ 4 และมีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าแรงกดต่ำกว่าข้าวเกรียบที่บรรจุในถุงโพลีโพรพิลีน ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น ดังได้กล่าวแล้วในข้อ 4.1 ทั้งนี้เนื่องจากความชื้นมีผลต่อเนื้อสัมผัสของอาหารขบเคี้ยว โดยทำให้โครงสร้างของเมตริกซ์แป้งอ่อนตัวและความเหนียวขึ้น ทำให้ความแข็งแรงของเนื้อสัมผัสในผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงมีความเหนียวเพิ่มขึ้น และความกรอบลดลง (Kate and Labuza, 1981; Martinez-Navarrate *et al.*, 2004) Sauvageot and Rlond (1991) พบว่าค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์อาหารเข้าจากรั้วพืชจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อมีค่า  $a_w$  ระหว่าง 0-0.5 หรือปริมาณความชื้นร้อยละ 7 หลังจากนั้นความกรอบจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยความชื้นที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวมีความเหนียวเพิ่มขึ้น (Suwonsichon and Peleg, 1998) และจากการศึกษาของ Mazumder *et al.* (2006) กล่าวว่าความชื้นมีบทบาทสำคัญต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์และมีผลโดยตรงต่อลักษณะความกรอบ โดยความชื้นที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ค่าแรงกดมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำ ส่งผลให้ความกรอบมีค่าลดลง ดังนั้นการบรรจุข้าวเกรียบในถุงโพลีโพรพิลีน ซึ่งอัตราการซึมผ่านของไอน้ำมากกว่าถุงอะลูมิเนียมลามิเนต ค่าความกรอบของข้าวเกรียบจึงมีค่าลดลงมากกว่าในระหว่างระยะเวลาการเก็บรักษา

ขณะที่ชนิดของแป้งไม่มีผลต่อค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ดังตารางภาคผนวกที่ 13 กล่าวคือ ข้าวเกรียบจากแป้งมันสำปะหลังและข้าวเกรียบแป้งผสมที่ปริมาณแป้งสาคร้อยละ 24 ในบรรจุภัณฑ์ชนิดเดียวกันและระยะเวลานึ่งที่เท่ากันมีค่าแรงกดไม่แตกต่างกัน เมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามภายหลังจากเก็บ

รักษานาน 5 สัปดาห์ พบว่าค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบจากแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มสูงกว่าข้าวเกรียบแป้งผสมที่มีปริมาณแป้งสาคร้อยละ 24 ในบรรจุภัณฑ์ทั้ง 2 ชนิด ทั้งนี้เนื่องจากข้าวเกรียบแป้งมันสำปะหลังมีโพรงอากาศที่ขนาดใหญ่กว่า อาจส่งผลให้ผนังเจลที่หุ้มโพรงอากาศบาง ผนังเซลล์เกิดการยุบตัว ทำให้เนื้อสัมผัสอ่อนตัวและเหนียวขึ้น ต้องใช้แรงกดมากในการทำให้ข้าวเกรียบแตกหัก ขณะที่ข้าวเกรียบแป้งผสมที่มีปริมาณแป้งสาคร้อยละ 24 มีอัตราการพองตัวน้อยกว่าและค่าแรงกดเริ่มต้นมีค่ามากกว่าแป้งมันสำปะหลัง (ทั้งนี้เป็นผลของปริมาณอะมิโลสของแป้งสาครที่สูงกว่าในแป้งมันสำปะหลัง) ซึ่งการเพิ่มปริมาณแป้งสาครในแป้งผสมมีผลให้อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบแป้งผสมลดลง โดยทำให้เกิดโพรงอากาศขนาดเล็กและมีจำนวนมากขึ้นเมื่อปริมาณแป้งสาครเพิ่มขึ้น ซึ่งโพรงอากาศขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจากแป้งสาครมีผลทำให้เกิดความสม่ำเสมอของโพรงอากาศในแผ่นข้าวเกรียบแป้งผสมหลังทอด ส่งผลให้โครงสร้างเนื้อสัมผัสของข้าวเกรียบแป้งผสมมีความแข็งแรง ทำให้การอ่อนตัวลงของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบแป้งผสมเนื่องจากปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นระหว่างการเก็บรักษา มีการเปลี่ยนแปลงช้ากว่า จึงอาจทำให้ค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบแป้งผสมมีอัตราการเพิ่มขึ้นช้ากว่าข้าวเกรียบจากแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว ดังนั้นจากผลดังกล่าวอาจจะมีผลให้ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบที่มีการผสมแป้งสาครทดแทนแป้งมันสำปะหลังสามารถคงความกรอบได้นานกว่าเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษานานขึ้น

Prince of Songkhla University  
Pattani Campus



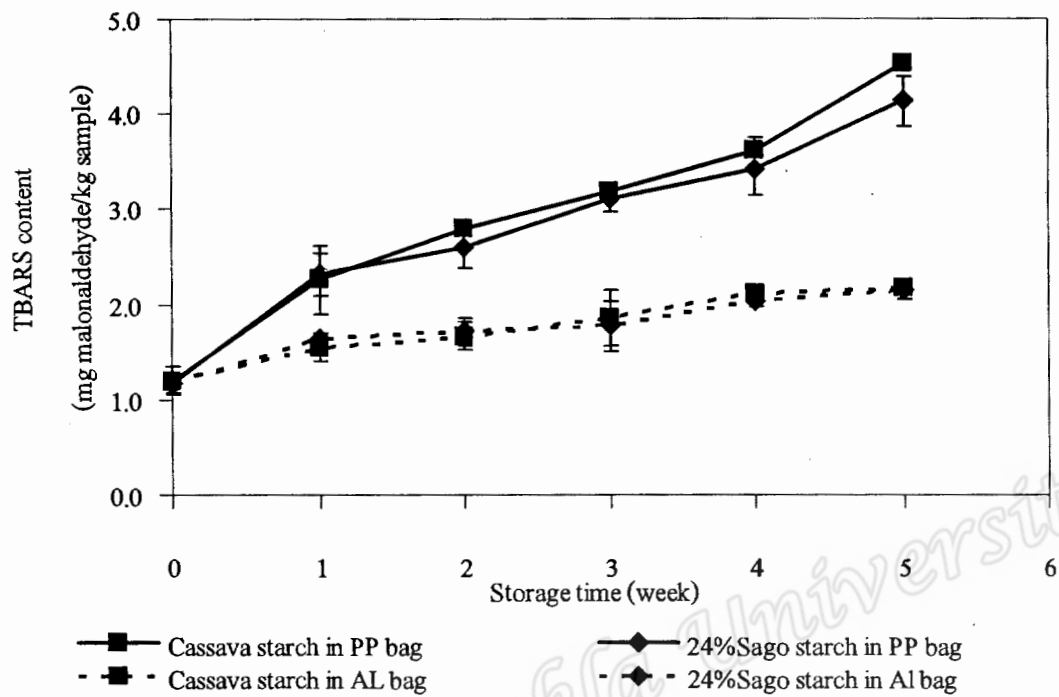
รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบหลังทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคุที่มีปริมาณแป้งสาคุเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0 และ 24 ภายหลังจากการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลาานาน 60 นาที ในถุงโพลีโพรพิลีนและถุงอะลูมิเนียมลามิเนต ระหว่างการเก็บรักษา 5 สัปดาห์

#### 4.4.3 ค่า TBARS

ผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณ TBARS ของข้าวเกรียบแป้งมันสำปะหลังและข้าวเกรียบแป้งผสมที่มีปริมาณแป้งสาคร้อยละ 24 ในระหว่างการเก็บรักษา (รูปที่ 4.23) พบว่าชนิดของบรรจุภัณฑ์ และระยะเวลาการเก็บรักษามีผลต่อค่า TBARS ของข้าวเกรียบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) ดังตารางภาคผนวกที่ 14 ขณะที่ชนิดของแป้งไม่มีผลต่อค่า TBARS ของข้าวเกรียบ ( $p > 0.05$ ) (ตารางภาคผนวกที่ 14) และไม่มีอิทธิพลร่วมกันระหว่างทั้ง 3 ปัจจัยนี้ ( $p > 0.05$ ) กล่าวคือ ปริมาณ TBARS ของข้าวเกรียบในทุกชุดการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น โดยข้าวเกรียบทั้ง 2 ชนิด ที่บรรจุในถุงโพลีโพรพิลีนมีปริมาณ TBARS สูงกว่าข้าวเกรียบที่บรรจุในถุงอะลูมิเนียมลามิเนตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) ดังตารางภาคผนวกที่ 14 ซึ่งค่า TBARS เป็นดัชนีบ่งบอกถึงการกลั่นหืนของผลิตภัณฑ์ที่มีไขมันเป็นองค์ประกอบ อันเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทั้งนี้เนื่องจากข้าวเกรียบผ่านกระบวนการทอดในน้ำมันที่อุณหภูมิสูง ทำให้มีน้ำมันแทรกอยู่ภายใน ซึ่งการเก็บรักษาโดยบรรจุในถุงอะลูมิเนียมลามิเนตที่มีคุณสมบัติป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ ก๊าซออกซิเจน และป้องกันแสงผ่านได้ดี ทำให้สามารถช่วยขจัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน ส่งผลให้การเกิดการหืนของข้าวเกรียบในถุงอะลูมิเนียมมีค่าน้อยกว่าตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ดังนั้นชนิดของบรรจุภัณฑ์จึงมีผลต่อการหืน เนื่องจากส่งผลต่อปริมาณความชื้น การซึมผ่านของออกซิเจน และแสง ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในระหว่างการเก็บรักษา

สำหรับชนิดของแป้งไม่มีผลต่อค่า TBARS ของข้าวเกรียบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ดังตารางภาคผนวกที่ 14 โดยข้าวเกรียบทั้ง 2 ชนิด ที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ชนิดเดียวกัน คือ ถุงโพลีโพรพิลีนและถุงอะลูมิเนียมลามิเนต มีค่า TBARS ไม่แตกต่างกัน ซึ่งข้าวเกรียบแป้งมันสำปะหลังและข้าวเกรียบแป้งผสมที่มีปริมาณแป้งสาคร้อยละ 24 ที่บรรจุในถุงโพลีโพรพิลีนและถุงอะลูมิเนียมลามิเนตมีค่า TBARS เฉลี่ยเท่ากับ 4.53, 4.13 และ 2.18, 2.15 มิลลิกรัม (รูปที่ 27) มาโลนอัลดีไฮด์ต่อกรัมของตัวอย่าง ตามลำดับ ภายหลังจากระยะเวลาการเก็บรักษานาน 5 สัปดาห์

จากการทดลองมีความสอดคล้องกับการศึกษาของณัฐนันท์ ชุมแก้ว (2543) ซึ่งกล่าวว่าค่าที่บีเอชของผลิตภัณฑ์ข้าวพองเสริมใยอาหารมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาในการเก็บรักษา ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันในกระบวนการออกซิเดชัน และจากการศึกษาของอัมพวัน ลิขิตหัตถศิลป์ (2547) พบว่าผลิตภัณฑ์กะหรี่บีบสดและทอดเกิดออกซิเดชันของไขมันตลอดระยะเวลาในการเก็บรักษา ทั้งนี้เนื่องจากการเหนียวของออกซิเจนให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้น ส่งผลให้ค่า TBARS เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น



รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TBARS ของข้าวเกรียบหลังทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาเกที่มีปริมาณแป้งสาเกเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0 และ 24 ภายหลังจากการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลาานาน 60 นาที ในถุงโพลีโพรพิลีนและถุงอะลูมิเนียมลามิเนต ระหว่างการเก็บรักษา 5 สัปดาห์