บทที่ 3

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง

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

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคู
Chemical compositions of cassava starch and sago starch

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 พบว่าแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูมีปริมาณอะมิโลสเท่ากับร้อยละ 17.44 และ 22.86 ตามลำดับ สำหรับปริมาณอะมิโลสในแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูร้อยละ 6, 12, 18 และ 24 มีค่าเท่ากับร้อยละ 17.89, 18.35, 19.80 และ 20.26 ตามลำดับ (ตารางที่ 3) ซึ่งปริมาณอะมิโลสในแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาคู และแป้งผสมมีความแตกต่างกัน ($p \leq 0.05$) (ตารางภาคผนวกที่ 1) โดยพบว่าปริมาณของอะมิโลสมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณของแป้งสาคูเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากแป้งสาคูมีปริมาณอะมิโลสเป็นองค์ประกอบสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง ผลการศึกษานี้มีความสอดคล้องกับรายงานของ Pongsawatmanit และคณะ (2002) ที่พบว่าแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณอะมิโลสโดยเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 17.0 และเช่นเดียวกันกับรายงานของ Defloor และคณะ (1998) ซึ่งกล่าวว่าปริมาณอะมิโลสในแป้งมันสำปะหลังมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 17.9-23.6 ส่วนปริมาณอะมิโลสในแป้งสาคูจากการทดลองนี้มีความสอดคล้องกับรายงานของ Piyachomkwan และคณะ (1999) ที่พบว่าแป้งสาคูมีค่าปริมาณของอะมิโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 18-21 นอกจากนี้มีรายงานของนักวิจัยท่านอื่นๆ ว่าพบปริมาณของอะมิโลสในแป้งสาคูที่แตกต่างออกไป 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) นอกจากนี้ปริมาณอะมิโลสที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับวิธีการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณอะมิโลสด้วย (Mile *et al.,* 2002)

ตารางที่ 3 ปริมาณอะมิโลสของแป้งดิบจากแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาคู และแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 6, 12, 18 และ 24

Amylose content of native starch from cassava starch, sago starch and starch mixtures (cassava and sago starches) with different levels of sago starch added (6, 12, 18, and 24 %)

Starch	Amylose content (%)
Sago starch	22.86 ± 0.59^{a}
Cassava starch	17.44 ± 0.51^{d}
6% Sago starch	17.89 ± 0.01^{cd}
12% Sago starch	18.35 ± 0.17^{c}
18% Sago starch	19.80 ± 0.09^{b}
24% Sago starch	20.26 ± 0.17^{b}

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

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

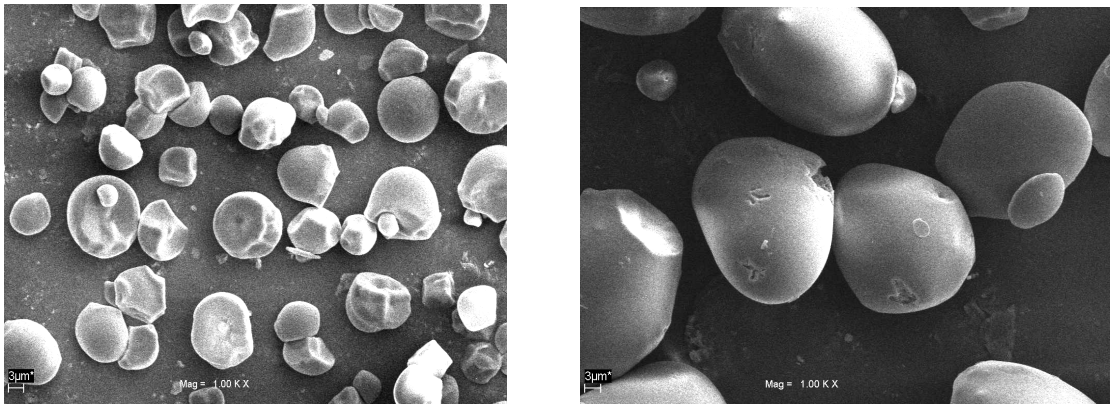
2. สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้ง

จากการศึกษาสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาคู และแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคู ที่กำหนดให้มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 6, 12, 18 และ 24 ตามลำดับ แล้วศึกษาสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งได้แก่ ลักษณะรูปร่างและขนาดของเม็ดแป้ง รูปแบบโครงสร้างผลึกของแป้งและลักษณะของมอลตีสครอส กำลังการพองตัวและการละลาย ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความหนืดของแป้งเปียก และอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้ง ซึ่งผลการศึกษาเป็นดังนี้

2.1 ลักษณะรูปร่างและขนาดของเม็ดแป้ง

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ที่กำลังขยาย

1,000 เท่า และค่าความต่างศักย์เท่ากับ 10 kV พบว่าเม็ดแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะรูปร่างกลมและส่วนปลายด้านหนึ่งจะมีลักษณะเว้าหรือคล้ายมีรอยตัด (ภาพที่ 5a) ส่วนเม็ดแป้งสาคูจะมีรูปร่างรีคล้ายรูปไข่และส่วนปลายอีกด้านมีลักษณะเหมือนรอยตัด (ภาพที่ 5b) เมื่อส่องด้วยกำลังขยายที่เท่ากัน (กำลังขยาย 1,000 เท่า) พบว่าเม็ดแป้งสาคูมีขนาดใหญ่กว่าเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

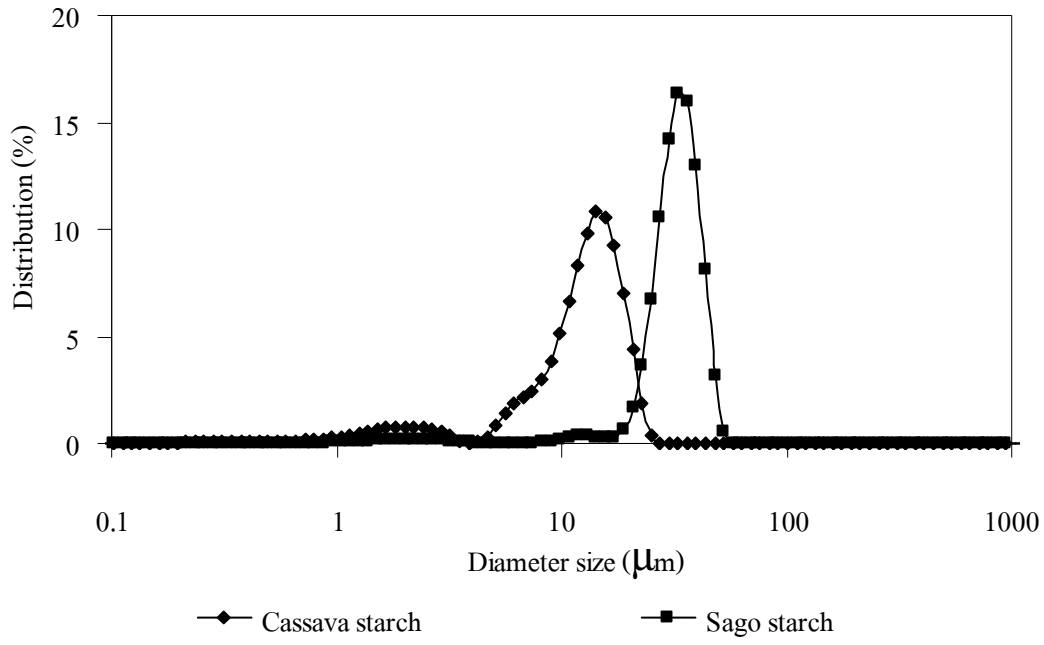


(a) Cassava starch (b) Sago starch

ภาพที่ 5 ลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งดิบจากแป้งมันสำปะหลัง (a) และแป้งสาคู (b) เมื่อส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า
SEM micrographs of native starch granule from cassava starch (a) and sago starch (b) (x1,000)

จากการวิเคราะห์การกระจายและขนาดของเม็ดแป้ง (ภาพที่ 6) พบว่าเม็ดแป้งมันสำปะหลังมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงระหว่าง 0.044-27.39 ไมครอน โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 12.93 ไมครอน ซึ่งแป้งมันสำปะหลังมีการกระจายของขนาดอนุภาคเม็ดแป้งช่วง 1-10 ไมครอน เท่ากับร้อยละ 24.64 และช่วง 10-100 ไมครอน เท่ากับร้อยละ 73.30 ส่วนแป้งสาคูอนุภาคมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.040-63.41 ไมครอน และขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 33.84 ไมครอน ซึ่งผลวิเคราะห์การกระจายของขนาดอนุภาคเม็ดแป้งสาคู พบว่าแป้งสาคูที่มีการกระจายของขนาดอนุภาคช่วง 1-10 ไมครอน มีอยู่เพียงร้อยละ 2.52 ในขณะที่เม็ดแป้งสาคูส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 96.87 มีการกระจายของขนาดในช่วงระหว่าง 10-100 ไมครอน (ตารางที่ 4) ซึ่งกล่าวได้ว่าแป้งสาคูมีขนาดของเม็ดแป้งใหญ่กว่าแป้งมันสำปะหลังประมาณ 2 เท่า ซึ่งผลการศึกษานี้มีความสอดคล้องกับรายงานของ Piyachomkwan และคณะ (1999) ที่พบว่าเม็ดแป้งสาคูมีขนาดอนุภาคระหว่าง 3-60 ไมครอน และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 17-36 ไมครอน ขณะที่ Sriroth และคณะ (1999) พบว่าเม็ดแป้งมัน

สำปะหลังมีขนาดระหว่าง 8-22 ไมครอน และมีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 15 ไมครอน Mishra และ Rai (2006) รายงานว่าแป้งมันสำปะหลังมีรูปร่างกลมและมีรอยตัด โดยมีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 7.1-25 ไมครอน ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 15 ไมครอน นอกจากนี้ Pomeranz (1991) รายงานว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของแป้งสาคู (25 ไมครอน) ใหญ่กว่าแป้งข้าวเจ้า (5 ไมครอน) แป้งข้าวสาลี (15 ไมครอน) แป้งข้าวโพด (15 ไมครอน) แป้งข้าวบาร์เล่ย์ (15 ไมครอน) และแป้งมันสำปะหลัง (20 ไมครอน) ตามลำดับ แป้งสาคูมีขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งโดยเฉลี่ยใหญ่กว่าแป้งจากธัญพืช (เช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวสาลี แป้งข้าวโพด แป้งข้าวบาร์เล่ย์) และแป้งจากพืชหัว (แป้งมันสำปะหลัง) แต่มีขนาดเล็กกว่าแป้งมันฝรั่งที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 38.3 ไมครอน (Li and Yeh, 2001)



ภาพที่ 6 การกระจายขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งดิบจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคู

Particle size distribution of native starch granule from cassava and sago starches

ตารางที่ 4 การกระจายขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งดิบจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคู
Particle size distribution of native starch granule from cassava and sago starches

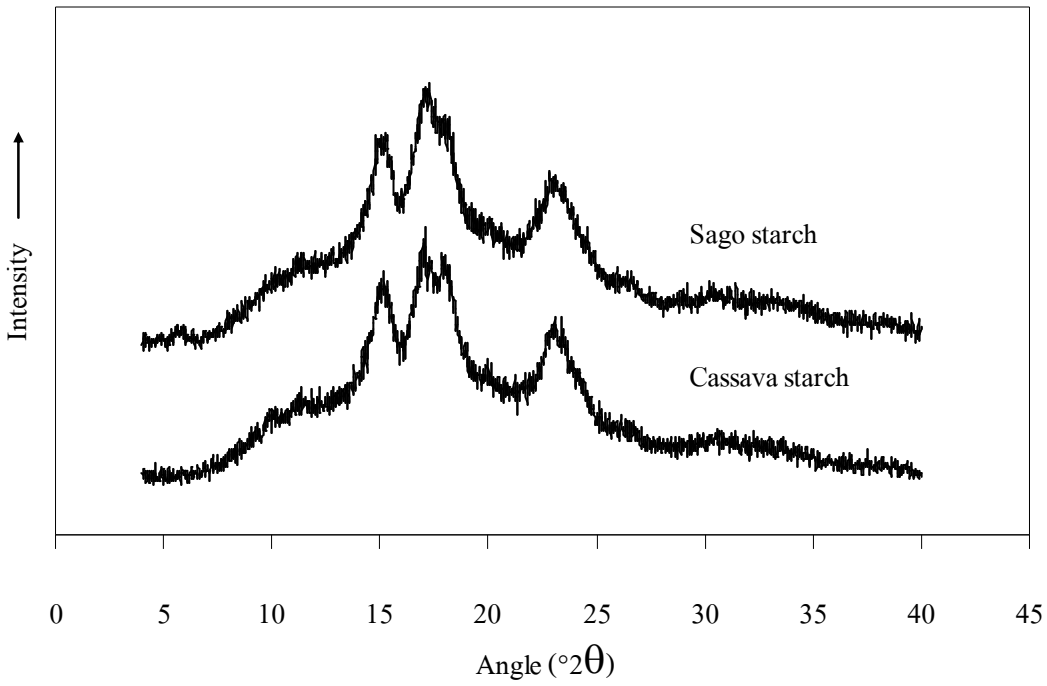
Starch Type	Ranges of granule size (μm)	Granule size in average (μm)	Distribution of starch granule (%)		
			<1μm	1-<10μ m	10-100 μm
Sago starch	0.040-63.41	33.84±9.349	0.61	2.52	96.87
Cassava starch	0.044-27.39	12.93±5.591	2.06	24.64	73.30

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

2.2 รูปแบบโครงสร้างผลึกและลักษณะมอลตีสครอสของแป้งดิบ

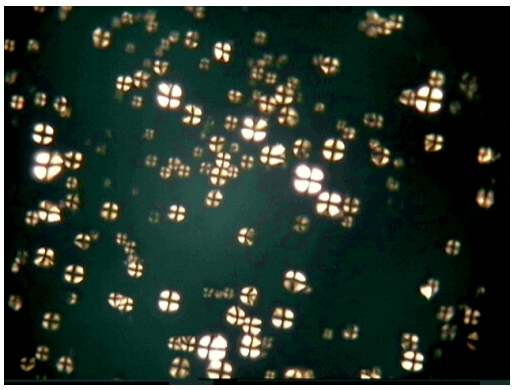
จากผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งโดยใช้เทคนิคการหักเหของรังสีเอ็กเรย์ด้วยเครื่อง XRD พบว่าแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาคู และแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูมีรูปแบบของโครงสร้างผลึกเป็นแบบ A ดังนั้นแป้งผสมย่อมมีโครงสร้างผลึกแบบ A ด้วยเช่นกัน โดยลักษณะที่ปรากฏคือมีที่ตำแหน่ง 15, 17, 18 และ 23°2θ (ภาพที่ 7) เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Sriburi (1999) และรายงานของ Atichokudomchai และคณะ (2002) ขณะที่รายงานของ Ahmad และคณะ (1999) พบว่าแป้งสาคูมีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ C ซึ่งเป็นลักษณะของโครงสร้างผลึกที่ผสมระหว่างผลึกแบบ A และ B มีความแตกต่างจากลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A คือจะพบว่ามีพีคอีกตำแหน่งที่ 5.6°2θ

นอกจากการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD แล้วยังสามารถตรวจสอบความเป็นผลึกของแป้งดิบได้โดยการตรวจการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ซึ่งจะเห็นมอลตีสครอส หรือลักษณะคล้ายกากบาท (Whistler and Bemiller, 1999) ดังแสดงในภาพที่ 8 ซึ่งลักษณะดังกล่าวของแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูมีความแตกต่างกัน และสามารถแยกแยะได้อย่างชัดเจนเนื่องจากเม็ดแป้งมันสำปะหลังมีขนาดเล็กกว่าเม็ดแป้งสาคู

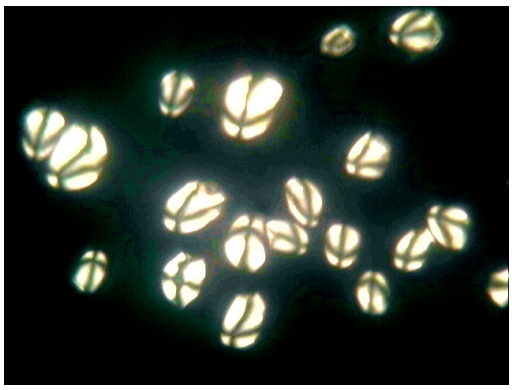


ภาพที่ 7 รูปแบบโครงสร้างผลึกของแป้งดิบจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคู

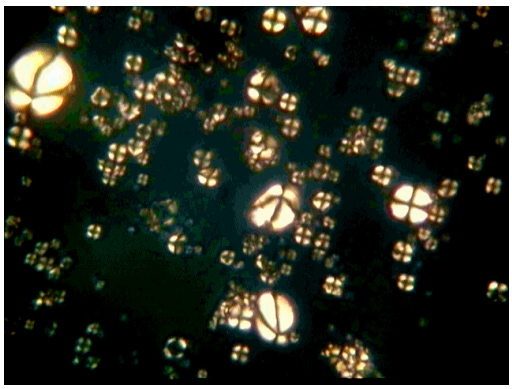
X-ray diffractograms of native starch from cassava and sago starches



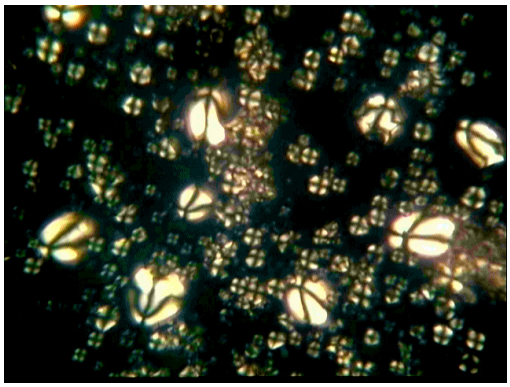
(a) Cassava starch



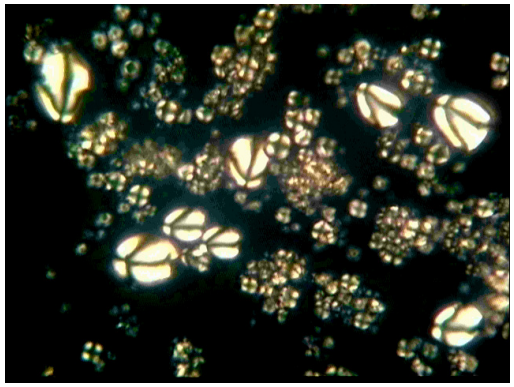
(b) Sago starch



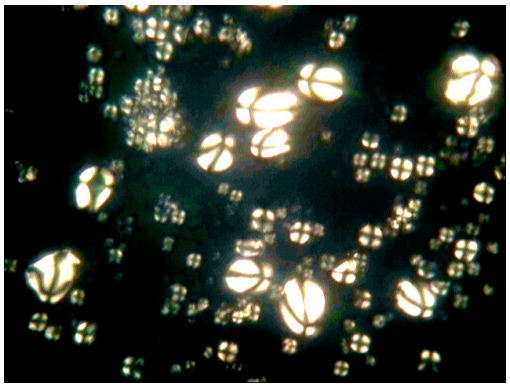
(c) 6% Sago starch



(d) 12% Sago starch



(e) 18% Sago starch



(f) 24% Sago starch

ภาพที่ 8 ลักษณะมอลตีสครอสของแป้งดิบจากแป้งมันสำปะหลัง (a) แป้งสาคู (b) และแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 6 (c), 12 (d), 18 (e) และ 24 (f) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์โพลาไรซ์ที่กำลังขยาย 400 เท่า

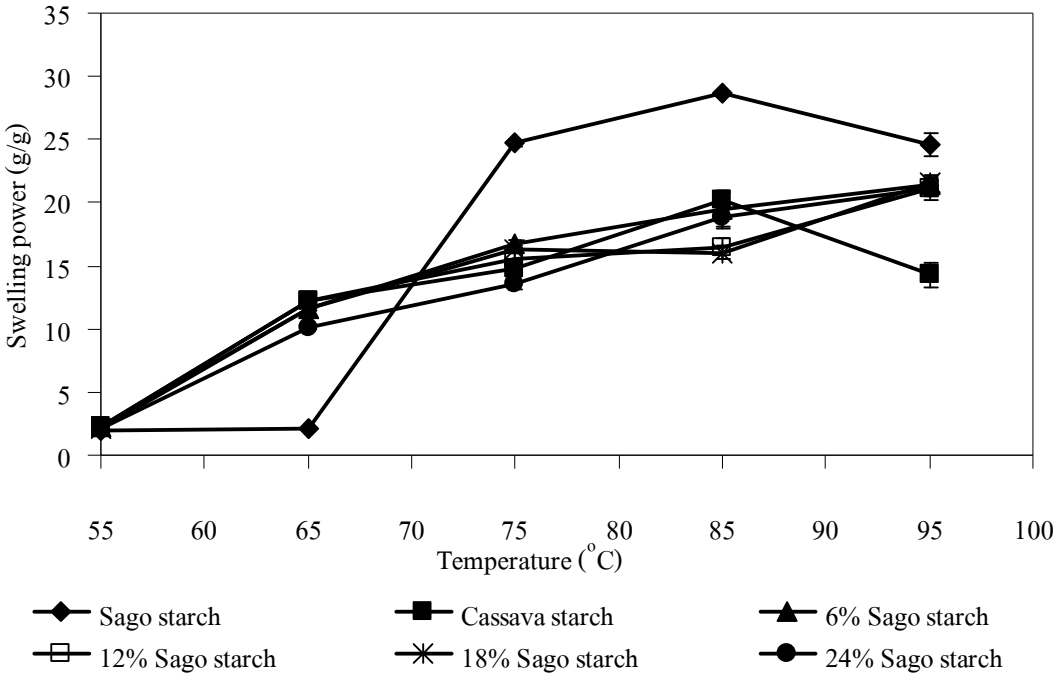
Maltese cross characteristic of native starch granule from cassava starch (a), sago starch (b), and the starch mixtures (cassava and sago starches) with different levels of sago starch added (6 (c), 12 (d), 18 (e), and 24% (f)) under polarized light microscope (x400)

2.3 กำลังการพองตัวและการละลาย

จากการวิเคราะห์กำลังการพองตัวและการละลายของแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาคู และแป้งผสมที่มีปริมาณแป้งทั้งสองชนิดในสัดส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 55, 65, 75, 85 และ 95°ซ โดยกำลังการพองตัวของแป้งจะแสดงเป็นน้ำหนักของเม็ดแป้งที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเม็ดแป้งพองตัวได้สูงสุดต่อน้ำหนักของตัวอย่าง สำหรับความสามารถในการละลายจะแสดงเป็นน้ำหนักของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่สามารถละลายได้ (Schoch, 1964) พบว่ากำลังการพองตัวของแป้งทุกชุดการทดลองเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (ภาพที่ 9) ซึ่งพฤติกรรมการพองตัวของแป้งสาคูมีความแตกต่างจากแป้งมันสำปะหลัง (ตารางภาคผนวกที่ 2) กล่าวคือ ที่อุณหภูมิ 55-65°ซ กำลังการพองตัวของแป้งมันสำปะหลังมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และมีค่าสูงกว่าแป้งสาคูอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางภาคผนวกที่ 2) โดยพบว่ามีกำลังการพองตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 85°ซ ในขณะที่ค่ากำลังการพองตัวของแป้งสาคูค่อนข้างคงที่ จนกระทั่งเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 65°ซ ขึ้นไป กำลังการพองตัวของแป้งสาคูเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่ามากกว่ากำลังการพองตัวของแป้งมันสำปะหลังเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 75°ซ อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางภาคผนวกที่ 2) โดยพบว่ามีกำลังการพองตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 85°ซ สำหรับพฤติกรรมการพองตัวของแป้งผสมทุกสัดส่วน พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกับแป้งมันสำปะหลัง โดยกำลังการพองตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและมีค่าสูงสุด ณ อุณหภูมิ 95°ซ ทั้งนี้อาจเนื่องจากแป้งผสมมีสัดส่วนของแป้งมันสำปะหลังสูงกว่าแป้งสาคู โดยทั่วไปเมื่อให้ความร้อนแก่น้ำแป้งจนมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้าจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่อิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัวขึ้น และโมเลกุลบางส่วนของจะละลายออกมา (Hoover, 2001; Singh *et al.,* 2003) ทั้งนี้การพองตัวของแป้งแต่ละชนิดที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของโมเลกุลภายในโครงสร้างของเม็ดแป้ง (Pomeranz, 1991) ซึ่งจากผลการศึกษาจะเห็นว่าการพองตัวของแป้งมันสำปะหลังเริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าแป้งสาคู อาจบ่งชี้ให้เห็นว่าความแข็งแรงของโครงสร้างเม็ดแป้งมันสำปะหลังอ่อนกว่าเม็ดแป้งสาคู. จึงทำให้แป้งมันสำปะหลังมีความสามารถในการดูดซับน้ำและเกิดการพองตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าแป้งสาคู ขณะที่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ 65°ซ แป้งสาคูเริ่มมีการพองตัวและการละลายเกิดขึ้นอย่างชัดเจน และในช่วงอุณหภูมิ 75-95°ซ พบว่าแป้งสาคูมีค่ากำลังการพองตัวสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง ทั้งนี้เมื่อพิจารณากำลังการพองตัวสูงสุดที่อุณหภูมิเดียวกันในช่วงดังกล่าว อาจเป็นผลเนื่องจากขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยของเม็ดแป้งสาคู (33.84 ไมครอน) ใหญ่กว่าแป้งมันสำปะหลัง (12.93 ไมครอน) เมื่อภายหลังได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น พันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย ขนาดเม็ดแป้งที่ใหญ่กว่าทำให้มีหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระจำนวนมาก ส่งผลให้เม็ดแป้งมีความสามารถจับกับโมเลกุลของน้ำไว้ภายในโครงสร้าง

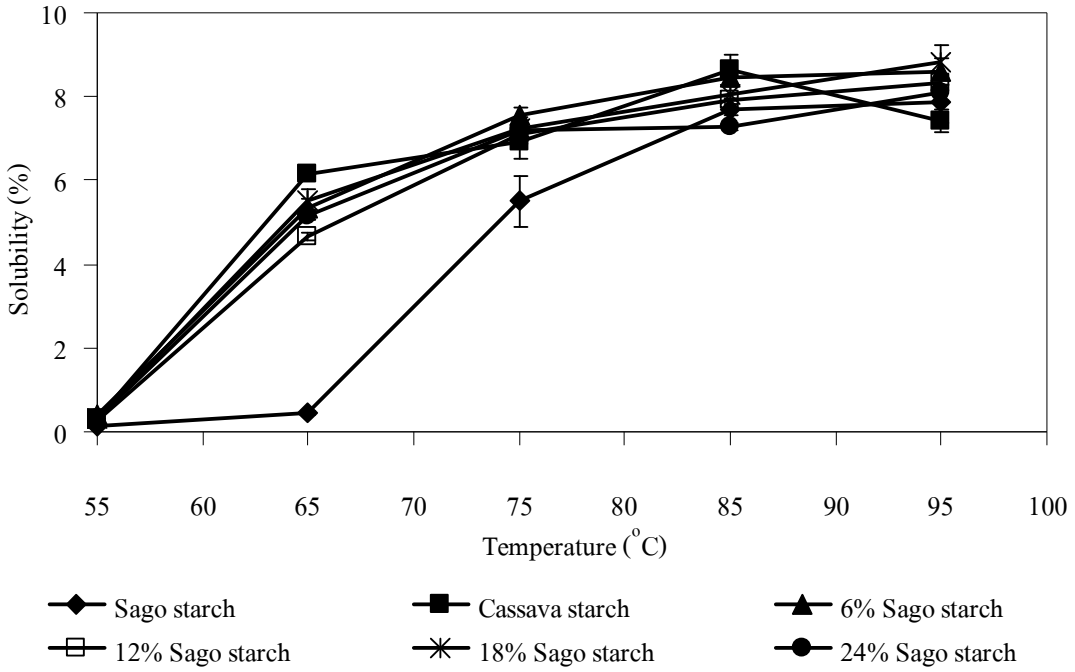
อนุภาคของเม็ดแป้งได้มากกว่า ทำให้น้ำหนักของเม็ดแป้งที่พองตัวเพิ่มขึ้นมีค่ามาก ส่งผลให้แป้งสาคูมีกำลังการพองตัวสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง (Wattanachant *et al.,* 2002) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Piyachomkwan และคณะ (1999) และรายงานของ Sriroth และคณะ (1999) ที่พบว่ากำลังการพองของแป้งสาคูมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อให้ความร้อนสูงกว่า 60°ซ และจากรายงานของ Srichuwong และคณะ (2005) พบว่ากำลังการพองตัวของแป้งมันสำปะหลังเริ่มเกิดขึ้นชัดเจนที่อุณหภูมิ 60°ซ และกำลังการพองตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 70°ซ ในขณะที่แป้งสาคูกำลังการพองตัวเริ่มเกิดขึ้นชัดเจนที่อุณหภูมิสูงกว่า 60°ซ และกำลังการพองตัวมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 80°ซ

ความสามารถในการละลายของแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาคู และแป้งผสมที่อุณหภูมิต่างๆ (ภาพที่ 10) พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในทุกชุดการทดลอง (ตารางภาคผนวกที่ 3) โดยช่วงอุณหภูมิ 55-65°ซ ความสามารถในการละลายของแป้งมันสำปะหลังและแป้งผสมมีค่ามากกว่าแป้งสาคูอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางภาคผนวกที่ 3) ขณะที่การละลายของแป้งสาคูมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่เมื่อให้ความร้อนสูงขึ้นกว่า 65°ซ แป้งสาคูมีค่าความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่าความสามารถในการละลายของแป้งมันสำปะหลังและแป้งผสม มีค่าสูงกว่าการละลายของแป้งสาคูเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (55-95°ซ) สำหรับการละลายของแป้งผสมที่ปริมาณของแป้งสาคูแตกต่างกัน พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกับแป้งมันสำปะหลัง ทั้งนี้อาจเนื่องจากความแข็งแรงของโครงสร้างเม็ดแป้งและโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังต่ำกว่าแป้งสาคู สังเกตได้จากเม็ดแป้งมันสำปะหลังเกิดการพองตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าแป้งสาคู



ภาพที่ 9 กำลังการพองตัวของแป้งดิบจากแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาคู และแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 6, 12, 18 และ 24 ที่อุณหภูมิ 55-95°ซ

Swelling power of native starch from cassava starch, sago starch and starch mixtures (cassava and sago starches) with different levels of sago starch added (6, 12, 18, and 24 %) at temperature 55-95°C



ภาพที่ 10 การละลายของแป้งดิบจากแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาคู และแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 6, 12, 18 และ 24 ที่อุณหภูมิ 55-95°ซ

Solubility of native starch from cassava starch, sago starch and the starch mixtures (cassava and sago starches) with different levels of sago starch added (6, 12, 18, and 24 %) at temperature 55-95°C

2.4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งผสม

จากการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาคู และแป้งผสมโดยใช้เครื่อง Rapid visco analyser (RVA) ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 11 โดยเมื่อแป้งได้รับความร้อนจนเกิดเจลาติไนเซชันเม็ดแป้งสามารถดูดซับน้ำและเกิดการพองตัว ซึ่งการพองตัวของเม็ดแป้งมีผลให้เกิดความหนืดเพิ่มขึ้น (Zobel and Stephen, 1995) จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงของความหนืด (Pasting temperature) ของแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาคู และแป้งผสม (ตารางที่ 5) มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางภาคผนวกที่ 4) โดยแป้งมันสำปะหลังความหนืดจะเริ่มปรากฏขึ้นที่อุณหภูมิ 72.0°ซ ขณะที่แป้งสาคูเริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่าคือ 77.2°ซ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์กำลังการพองตัวที่พบว่าแป้งมัน

สำปะหลังเริ่มพองตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าแป้งสาคู จากรายงานของ Piyachomkwan และคณะ (1999) พบว่าอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งสาคูอยู่ในช่วง 76-77°ซ ขณะที่ Ahmad และคณะ (1999) รายงานไว้ที่ 72.5-74.0°ซ จากการศึกษาของ Srichuwong และคณะ (2005) พบว่าอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งมันสำปะหลังต่ำกว่าแป้งสาคู สำหรับแป้งผสมที่ปริมาณของแป้งสาคูแตกต่างกันมีค่าอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดในช่วง 72.43-72.98°ซ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับแป้งมันสำปะหลังมากกว่าแป้งสาคู ซึ่งอาจเป็นผลจากสัดส่วนของแป้งผสมประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนใหญ่ ส่งผลให้อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งผสมมีค่าใกล้เคียงกับแป้งมันสำปะหลัง

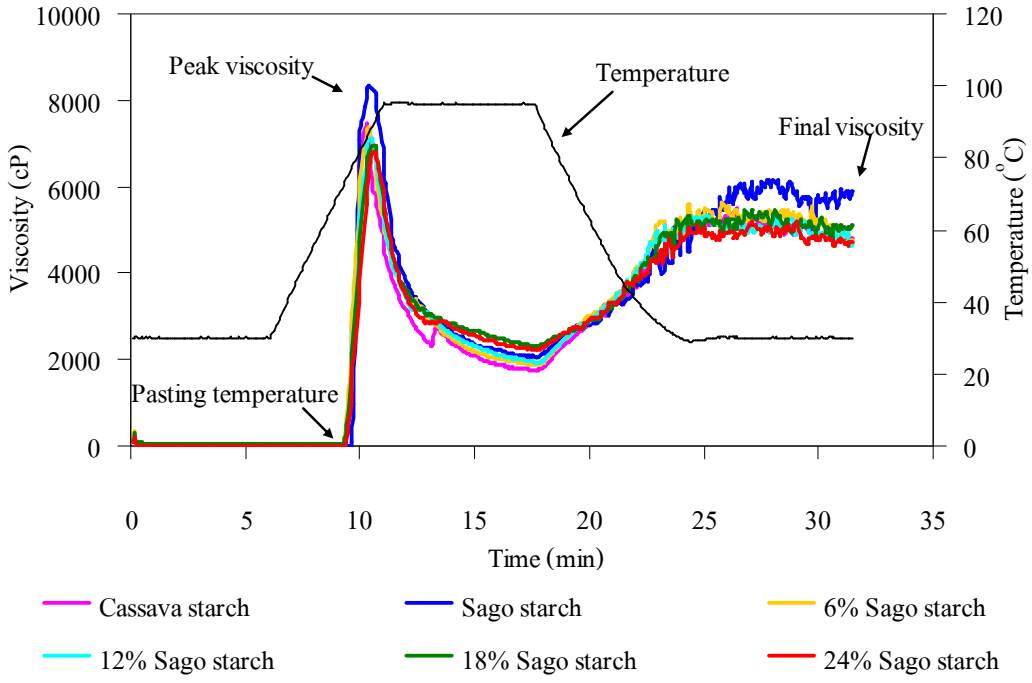
ค่าความหนืดสูงสุดซึ่งบ่งบอกถึงการพองตัวสูงสุดของเม็ดแป้ง พบว่าของแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาคู และแป้งผสมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางภาคผนวกที่ 4) โดยความหนืดสูงสุดของแป้งสาคู (8374.50 เซนติพอยซ์) มีค่าสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง (7433.00 เซนติพอยซ์) และแป้งผสม (6734.50-7312.00 เซนติพอยซ์) และเมื่อพิจารณาค่าความเสถียรของเม็ดแป้งที่เกิดการพองตัวแล้ว (Breakdown) หลังการเกิดเจลาติไนเซชัน จะพบว่าแป้งสาคูมีค่าความเสถียรต่อแรงกวน (6242.50 เซนติพอยซ์) สูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง (5630.00 เซนติพอยซ์) และแป้งผสม (4559.00-5448.50 เซนติพอยซ์) จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาความหนืดสูงสุดของแป้งผสมมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของแป้งสาคูเพิ่มขึ้น ทั้งที่ความหนืดสูงสุดของแป้งสาคูมีค่าสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง ทั้งนี้กรณีความหนืดสูงสุดของแป้งสาคูเพียงอย่างเดียวมีสัดส่วนของปริมาณแป้งสาคูมากกว่าในของแป้งผสม และการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งผสมมีลักษณะใกล้เคียงกับแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งอาจเป็นเพราะในแป้งผสมมีสัดส่วนของแป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนใหญ่ การเพิ่มปริมาณของแป้งสาคูจึงทำให้สัดส่วนของแป้งมันสำปะหลังน้อยลงและมีผลให้ปริมาณอะมิโลสของแป้งผสมเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้ความหนืดสูงสุดของแป้งผสมมีค่าลดลง โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงความหนืดในแป้งผสมที่มีความแตกต่างจากแป้งเดี่ยว อาจเนื่องจากการมีขนาดของเม็ดแป้งที่แตกต่างกันอยู่ร่วมกันทำให้ความสามารถในการดูดซับและการพองตัวของเม็ดแป้งมีความแตกต่างกัน โดยเมื่อพิจารณากำลังการพองตัวหรืออุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มปรากฏของแป้งมันสำปะหลังเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าแป้งสาคู ดังนั้นในกรณีที่ผสมแป้งเข้าด้วยกัน เม็ดแป้งมันสำปะหลังจึงสามารถดูดซับน้ำและเกิดการพองตัว ทำให้ความหนืดเกิดขึ้นก่อนแป้งสาคู ขณะที่ในแป้งสาคู การพองตัวและความหนืดเริ่มปรากฏที่อุณหภูมิสูงกว่า ดังแสดงในตารางที่ 5

ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) ซึ่งเป็นความหนืดในช่วงการลดอุณหภูมิจาก 95 เป็น 30°ซ และคงที่ที่อุณหภูมินี้ พบว่าความหนืดสุดท้ายของแป้งสาคูและแป้งมันสำปะหลังมีค่าเท่ากับ 5842.50 และ 4816.50 เซนติพอยซ์ ส่วนแป้งผสมพบว่ามีค่าความหนืดสุดท้ายใกล้เคียงกับ

แป้งมันสำปะหลังคือมีค่าระหว่าง 4701.50-5108.50 เซนติพอยซ์ สำหรับค่าการคืนตัว (Set back) ซึ่งเป็นความหนืดที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์เกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งเช่นกัน พบว่าแป้งสาคูมีค่าการคืนตัวสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งอะมิโลสเป็นองค์ประกอบที่มีผลต่อค่าการคืนตัวของแป้ง (Wang *et al.,* 2002) กล่าวคือเนื่องจากแป้งที่ผ่านการเกิดเจลาติไนเซชันแล้วภายหลังเมื่อลดอุณหภูมิของแป้งเปียกลง ส่งผลให้โมเลกุลอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล ทำให้เกิดโครงข่ายที่แข็งแรงของเจลและมีผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ในการศึกษานี้ตัวอย่างแป้งสาคูมีปริมาณอะมิโลสสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง จึงทำให้ความหนืดสุดท้ายสูงกว่า ค่าการคืนตัวหรือการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งสาคูจึงมีค่ามากกว่าแป้งมันสำปะหลัง

จากผลการทดลองจะเห็นว่าในทุกค่าของลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งสาคูมีค่าสูงกว่าแป้งมันสำปะหลังและแป้งผสมในทุกสัดส่วนและพบว่าแป้งสาคูมีอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงของความหนืดสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงการพองตัว เนื่องจากด้วยเหตุข้างต้นที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ขนาดของเม็ดแป้งสาคูที่ใหญ่กว่า ทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำและการพองตัวของเม็ดแป้งสาคูสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง ส่งผลให้ความหนืดมีค่าสูงกว่า ซึ่งผลการวิเคราะห์ความหนืดด้วยเครื่อง RVA มีความสอดคล้องการผลการวิเคราะห์กำลังการพองตัวของแป้งที่พบว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 75°ซ กำลังการพองตัวของแป้งสาคูมีค่าสูงกว่าแป้งมันสำปะหลังและแป้งผสม เช่นเดียวกับรายงานของ Wattanachant และคณะ (2002) กล่าวว่าแป้งสาคูซึ่งมีอะมิโลสสูงเท่ากับร้อยละ 27 ให้ค่ากำลังการพองตัวมากกว่าเมื่อเทียบกับแป้งที่มีอะมิโลสต่ำกว่าอย่างเช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพดเหนียว และแป้งข้าวบาร์เล่ย์เหนียว ซึ่งมีอะมิโลสเป็นองค์ประกอบเท่ากับร้อยละ 17, 17, 1 และ 5 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเม็ดแป้งสาคูมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนเซชัน พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้าจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่อิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัว และโมเลกุลบางส่วนของจะละลายออกมา ทำให้เกิดความหนืดขึ้น ซึ่งแป้งสาคูมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ ทำให้มีหมู่ไฮดรอกซิลที่อิสระเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำสามารถเข้าจับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระได้มากกว่าแป้งที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นเม็ดแป้งสาคูมีปริมาตรของการขยายตัวหรือสามารถพองตัวได้มากกว่าจึงส่งผลให้ความหนืดสูงสุดของแป้งสาคูมีค่าสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง เช่นเดียวกับรายงานของ Srichuwong และคณะ (2005) กล่าวว่าการเปลี่ยนแปลงของความหนืดมีความสัมพันธ์กับการพองตัวของเม็ดแป้ง ซึ่งการพองตัวของเม็ดแป้งเป็นผลจากการสูญเสียโครงสร้างผลึกของอะมิโลเพคติน กล่าวคือ แป้งที่มีขนาดกิ่งสาขาในอะมิโลเพคตินยาวจะส่งเสริมให้โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งมีความแข็งแรง เม็ดแป้งจึงเกิดการพองตัวได้ช้า เป็นผลให้อุณหภูมิที่เริ่มการเปลี่ยนแปลงของความหนืดมีค่าสูง ในขณะที่แป้งที่มีขนาดกิ่ง

สาขาในอะมิโลเพคตินสั้นเม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวและแตกตัวได้ง่ายส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของความหนืดเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า และปริมาณอะมิโลสที่สูงในแป้งจะมีผลให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวและเกิดความหนืดได้อย่างจำกัด



ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งดิบจากแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาคู และแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 6, 12, 18 และ 24

Pasting characteristics of native starch from cassava starch, sago starch and the starch mixtures (cassava and sago starches) with different levels of sago starch added (6, 12, 18, and 24 %)

ตารางที่ 5 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งดิบจากแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาคู และแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 6, 12, 18 และ 24

Pasting characteristics of native starch from cassava starch, sago starch and the starch mixtures (cassava and sago starches) with different levels of sago starch added (6, 12, 18, and 24 %)

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

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

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

2.5 อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน

จากผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาคู และแป้งผสมที่ปริมาณของแป้งสาคูร้อยละ 6, 12, 18 และ 24 ด้วยเครื่อง DSC (ตารางที่ 6 และภาพที่ 12) พบว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาคู และแป้งผสมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางภาคผนวกที่ 5) กล่าวคือแป้งสาคูมีอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันสูงกว่าแป้งมันสำปะหลังและแป้งผสม โดยแป้งสาคูมีค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลาติไนเซชัน (T_O) อุณหภูมิสูงสุดของการเกิดเจลาติไนเซชัน (T_P) และอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลาติไนเซชัน (T_C) เท่ากับ 66.85, 74.08 และ 79.10°ซ ตามลำดับ ในขณะที่แป้งมันสำปะหลังมีค่าเท่ากับ 62.67, 68.50 และ 76.15°ซ ตามลำดับ กรณีของแป้งผสม พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งผสมที่ปริมาณของแป้งสาคูต่างกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) (ตารางภาคผนวกที่ 5) คือมีค่าอยู่ในช่วง 62.76-62.89°ซ และมีค่าใกล้เคียงอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งมันสำปะหลัง ส่วนอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิด เจลาติไนเซชันของแป้งผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของแป้งสาคูเพิ่มขึ้น ซึ่งอุณหภูมิสูงสุดของการเกิดเจลาติไนเซชันมีค่าอยู่ในช่วง 68.67-68.83°ซ และอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลาติไนเซชันจะมีค่าอยู่ในช่วง 76.24-78.55°ซ และจากเทอร์โมแกรมที่ได้ (ภาพที่ 12) จะเห็นว่ามีพีคปรากฏเพียงพีคเดียว โดยลักษณะพีคของแป้งผสมจะกว้างกว่าพีคของแป้งมันสำปะหลังและกว้างขึ้นเมื่อสัดส่วนของแป้งสาคูเพิ่มขึ้น นั่นคือช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน (T_O-T_C, ΔT) ของแป้งผสมจะกว้างกว่าแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคู และเมื่อปริมาณแป้งสาคูในแป้งผสมเพิ่มขึ้น ค่า ΔT ก็จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางภาคผนวกที่ 5) โดยมีค่าเท่ากับ 12.26, 13.48, 13.36, 14.80, 15.49 และ 15.79°ซ ตามลำดับ

ค่าพลังงานเอนทัลปี (ΔH) แสดงถึงพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะระหว่างโมเลกุลภายในโครงสร้างของเม็ดแป้งในระหว่างการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้ง (Cooke and Gidley, 1992) พบว่า ค่า ΔH ของแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาคู และแป้งผสมมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) (ตารางภาคผนวกที่ 5) คือมีค่าอยู่ในช่วง 13.53-15.08 จูลต่อกรัม

ผลจากการศึกษานี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Piyachomkwan และคณะ (1999) ที่พบว่าแป้งสาคูมีอุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิสูงสุด และอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลาติไนเซชันอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 63.50-68.34, 71.98-73.40 และ 82.08-84.97°ซ ตามลำดับ และพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชันมีค่าเท่ากับ 16.25-19.55 จูลต่อกรัม ขณะที่ Ahmad และคณะ (1999) พบว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งสาคูที่ศึกษามีค่าอยู่ในช่วง 69.4-70.1°ซ และ

จากรายงานของ Cui และ Oates (1996) ก็พบว่าแป้งสาคูมีค่าอุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิสูงสุด และอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลาติไนเซชันเท่ากับ 67.2, 74.0 และ 88.2°ซ ตามลำดับ และค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชันมีค่าเท่ากับ 15.6 จูลต่อกรัม

กรณีของแป้งมันสำปะหลัง ผลการศึกษานี้ความสอดคล้องกับรายงานของ Li และ Yeh (2001) ที่พบว่าแป้งมันสำปะหลังมีอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลาติไนเซชันเท่ากับ 64.5°ซ อุณหภูมิสูงสุดของการเกิดเจลาติไนเซชันเท่ากับ 71.0°ซ และค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชันเท่ากับ 13.0 จูลต่อกรัม นอกจากนี้รายงานของ Gunaratne และ Hoover (2002) ยังพบว่าอุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิสูงสุด และอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งมันสำปะหลังมีค่าเท่ากับ 63.0, 71.5 และ 81.5°ซ ตามลำดับ และพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชันเท่ากับ 12.3 จูลต่อกรัม

ตารางที่ 6 อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งดิบจากแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาคู และแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 6, 12, 18 และ 24

Gelatinization temperature of native starch from cassava starch, sago starch and the starch mixtures (cassava and sago starches) with different levels of sago starch added (6, 12, 18, and 24 %)

Starch	T_O (°C)	T_P (°C)	T_C (°C)	ΔT (°C)	ΔH (J/g)
Sago starch	66.85±0.22^{a}	74.08±0.12^{a}	79.10±0.47^{a}	12.26±0.24^{d}	14.93±1.00^{a}
Cassava starch	62.67±0.13^{b}	68.50±0.00^{c}	76.15±0.03^{c}	13.48±0.15^{c}	14.60±0.67^{a}
6% Sago starch	62.89±0.22^{b}	68.75±0.12^{bc}	76.24±0.67^{c}	13.36±0.45^{c}	15.08±0.71^{a}
12% Sago starch	62.77±0.09^{b}	68.75±0.12^{bc}	77.57±0.24^{b}	14.80±0.14^{b}	14.86±0.39^{a}
18% Sago starch	62.85±0.22^{b}	68.67±0.00^{bc}	78.34±0.18^{ab}	15.49±0.04^{ab}	13.53±1.33^{a}
24% Sago starch	62.76±0.09^{b}	68.83±0.24^{b}	78.55±0.35^{a}	15.79±0.44^{a}	14.24±0.11^{a}

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

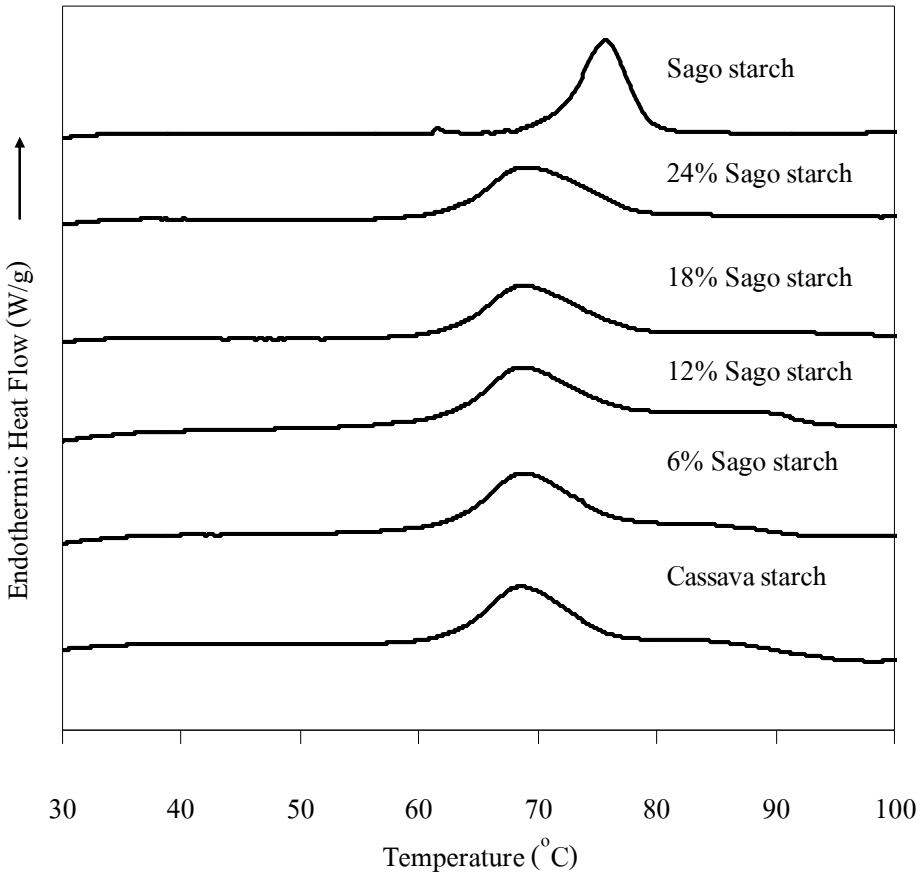
The different superscripts in the column denote the significant differences ($p \leq 0.05$).

T_O : Onset temperature; T_P : Peak temperature; T_C : Conclusion temperature; ΔT : Gelatinization temperature range (T_O-T_C) ; ΔH : Enthalpy (J/g of dry wt.)

สำหรับแป้งผสม พบว่าช่วงอุณหภูมิของกระบวนการเกิดเจลาติไนเซชันของจะครอบคลุมช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคู กล่าวคือ อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งผสมจะใกล้เคียงกับแป้งมันสำปะหลังซึ่งมีค่าต่ำกว่าแป้งสาคู และอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งผสมจะเพิ่มขึ้นและมีค่าใกล้เคียงแป้งสาคูมากขึ้น เมื่อสัดส่วนแป้งสาคูเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลให้ช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งผสม กว้างกว่าแป้งเดี่ยวๆ ทั้งสองชนิด โดยปริมาณอะมิโลสที่สูงขึ้นในแป้งผสมอาจมีส่วนทำให้อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันสูงขึ้น เช่นเดียวกับรายงานของ Knutson (1990) และ Varavinit และคณะ (2003)

จากรายงานของ Ortega-Ojeda และ Eliasson (2001) ที่ศึกษาสมบัติของแป้งผสมระหว่างแป้งมันฝรั่ง-แป้งข้าวโพดเหนียว, แป้งมันฝรั่ง-แป้งข้าวบาร์เล่ย์ และแป้งข้าวโพดเหนียว-แป้งข้าวบาร์เล่ย์ที่สัดส่วน 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 ซึ่งพบว่าเทอร์โมแกรม DSC ของแป้งผสมระหว่างแป้งมันฝรั่ง-แป้งข้าวโพดเหนียว และแป้งข้าวโพดเหนียว-แป้งข้าวบาร์เลย์ จะปรากฏพีคขึ้นมา 2 พีค เนื่องจากมีช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันต่างกัน ในขณะที่แป้งมันฝรั่ง-แป้งข้าวบาร์เล่ย์มีพีคปรากฏเพียงพีคเดียว ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของแป้งแต่ละชนิดเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน ทำให้เกิดการซ้อนทับกันระหว่างพีคของแป้งทั้งสอง

นอกจากนี้รายงานของ Hagenimana และคณะ (2005) กล่าวว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งข้าวผสม บนเทอร์โมแกรม DSC ที่ปรากฏพีคขึ้นมา 2 พีค เกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนที่สามารถทำลายโครงสร้างผลึกของแป้งทั้ง 2 ชนิด อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ดังนั้นแป้งผสมจึงมีอุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนเซชันเปลี่ยนแปลงไปจากแป้งเดี่ยว โดยมีผลให้อุณหภูมิเริ่มต้น และอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลาติไนเซชันเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งผสมจะเป็นลักษณะการแข่งขันระหว่างแป้งในสภาวะที่มีน้ำเนื่องจากความสามารถในการดูดซับและการพองตัวที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 12 อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งดิบจากแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาคู และแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 6, 12, 18 และ 24

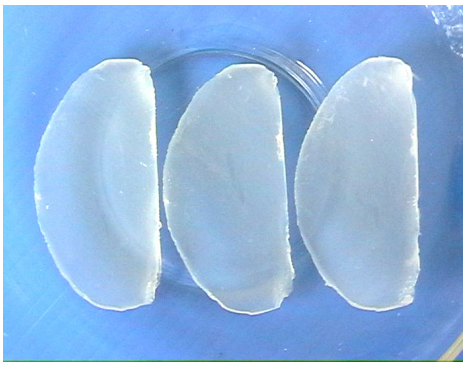
Gelatinization temperature of native starch from cassava starch, sago starch and the starch mixtures (cassava and sago starches) with different levels of sago starch added (6, 12, 18, and 24 %)

3. การเปลี่ยนแปลงสมบัติของข้าวเกรียบแป้งผสมก่อนและหลังการทอด

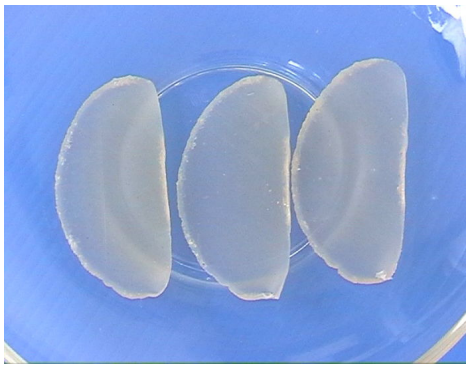
จากการทดลองผลิตข้าวเกรียบแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคู ตามกระบวนการผลิตในข้อ 3 (บทที่ 2) โดยกำหนดปัจจัยที่ศึกษาคือ ปริมาณร้อยละของแป้งสาคูในแป้งผสมเท่ากับ 5 ระดับ (คือเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24) และระยะเวลาการนึ่ง 8 ระดับ (คือเท่ากับ 25, 35, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 นาที) ซึ่งในการทดลองจะตรวจวิเคราะห์สมบัติของข้าวเกรียบแป้งผสมก่อนการทอดและหลังการทอด เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งในระหว่างกระบวนการผลิตข้าวเกรียบ ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

3.1 สมบัติของข้าวเกรียบแป้งผสมก่อนการทอด

แผ่นข้าวเกรียบแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่ได้มีลักษณะสีใสแววดังภาพที่ 13 ซึ่งแผ่นข้าวเกรียบจากทุกชุดการทดลองมีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 8-9 (ตารางที่ 7) ตรวจวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของข้าวเกรียบแป้งผสมก่อนการทอด ได้แก่ ลักษณะมอลตีสครอสรูปแบบโครงสร้างผลึก ระดับของการเกิดเจลาติไนเซชัน ความสามารถในการดูดซับและละลายน้ำ ผลการศึกษาเป็นดังนี้



Dough of cassava starch



Dough of 24% sago starch

ภาพที่ 13 ภาพตัดขวางของโดข้าวเกรียบที่ยังไม่ผ่านการทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0 และ 24 ภายหลังการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°ซ ระยะเวลานาน 60 นาที

Cross section of cracker dough produced from the mixture between cassava and sago starches with different levels of sago starch added (0 and 24%) after steaming at 100°C for 60 min

ตารางที่ 7 ปริมาณความชื้นของข้าวเกรียบที่ยังไม่ผ่านการทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

Moisture content of raw cracker produced from the mixture between cassava and sago starches with different levels of sago starch added (0, 6, 12, 18 and 24%)

%Sago starch	Moisture content (%)							
	Steaming time (min)							
	25	35	45	60	75	90	105	120
0% Sago starch (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% Sago starch	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% Sago starch	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% Sago starch	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% Sago starch	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.

3.1.1 ลักษณะมอลตีสครอสของข้าวเกรียบแป้งผสม

โดยทั่วไปความสามารถในการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ของแป้ง และปรากฏลักษณะมอลตีสครอสจะพบในกรณีของแป้งดิบ เนื่องจากเม็ดแป้งมีลักษณะโครงสร้างแบบกึ่งผลึกโครงสร้างผลึกในเม็ดแป้ง เป็นส่วนที่มีสมบัติในการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ (Eliasson and Gudmundsson, 1996; Hoseney, 1994) และแป้งที่ผ่านเกิดเจลาติไนเซชันโดยสมบูรณ์จะสูญเสียคุณสมบัติดังกล่าว (Atwell *et al*., 1988; Biliaderis, *et al*., 1980; Donovan, 1979; Evans and Haisman, 1982; Stevens and Elton, 1981) ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นก่อนการแตกของเม็ดแป้ง (Yeh and Li, 1996)

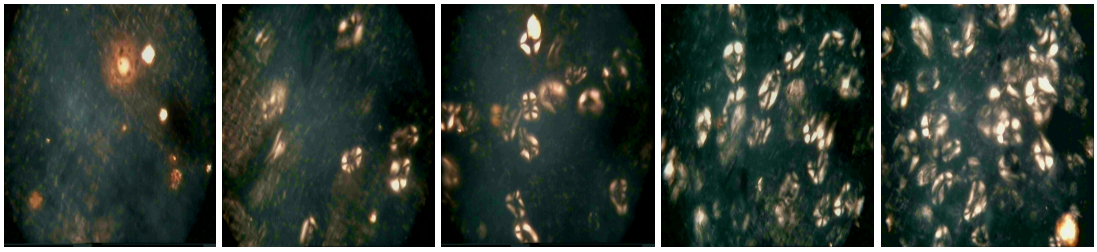
จากการตรวจลักษณะดังกล่าวของตัวอย่างโดข้าวเกรียบแป้งผสมหลังการนึ่งทุกชุดการทดลอง พบว่ายังคงมองเห็นลักษณะที่เกิดจากการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ในข้าวเกรียบแป้งผสมทุกชุดการทดลอง ยกเว้นก้อนโดของข้าวเกรียบแป้งมันสำปะหลัง (ชุดควบคุม) (ภาพที่ 14a-14h) โดยที่มีทั้งลักษณะที่เป็นมอลตีสครอสที่สมบูรณ์และไม่สมบูรณ์ และลักษณะดังกล่าวเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณของแป้งสาคูในแป้งผสมเพิ่มขึ้น จึงอาจเป็นไปได้ว่าลักษณะดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากแป้งสาคูที่กระจายอยู่บนก้อนโดของข้าวเกรียบแป้งผสมและแม้ระยะเวลาการนึ่งที่นานถึง 120 นาที ก็พบว่ายังสามารถมองเห็นลักษณะที่เกิดจากการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ปรากฏอยู่ แต่การกระจายและปริมาณที่เห็นจะลดลงเมื่อระยะเวลาการนึ่งนานขึ้น ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าเม็ดแป้งในโดข้าวเกรียบแป้งผสมเกิดการเจลาติไนเซชันที่ไม่สมบูรณ์ และมีโครงสร้างผลึกบางส่วนที่ยังไม่ถูกทำลาย จึงแสดงคุณสมบัติในการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์เมื่อส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์ระนาบแสงโพลาไรซ์ ซึ่งน่าจะเป็นเม็ดแป้งสาคูเป็นส่วนใหญ่ เพราะปริมาณมากขึ้น เมื่อปริมาณของแป้งสาคูเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งสาคู (66.85-79.10°ซ) สูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง (62.67-76.15°ซ) ทำให้แป้งสาคูเกิดการเจลาติไนเซชันได้ช้ากว่าแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งนั่นหมายถึงว่าโครงสร้างของโมเลกุลและการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของแป้งสาคูมีความแข็งแรงมากกว่าแป้งมันสำปะหลัง ดังนั้นในระหว่างการนึ่งก้อนโดของแป้งผสมระหว่างแป้งทั้งสองชนิดดังกล่าวเกิดการแข่งขันในการจับกับโมเลกุลของน้ำและดูดซับน้ำ โดยแป้งมันสำปะหลังถูกทำลายและเกิดเจลาติไนเซชันได้เร็วกว่า ส่งผลให้เกิดการดูดซับน้ำที่อยู่รอบๆ เม็ดแป้งได้มากกว่าแป้งสาคู ทำให้เม็ดแป้งสาคูมีโอกาสสูงในการเกิดเจลาติไนเซชันที่ไม่สมบูรณ์

ปัจจัยหนึ่งที่อาจมีผลให้เม็ดแป้งบางส่วนในก้อนโดของข้าวเกรียบแป้งผสมเกิดเจลาติไนเซชันได้ไม่สมบูรณ์ถึงแม้ระยะเวลาการนึ่งนาน 2 ชั่วโมง คือ ในระหว่างการนึ่งให้ความร้อนก้อนโด อาจเป็นผลเนื่องจากน้ำที่อยู่บริเวณผิวชั้นนอกของก้อนโดเกิดการระเหย ทำให้น้ำที่จุด

กึ่งกลางของก้อนโดเคลื่อนตัวออกสู่ชั้นนอกทำให้มีน้ำเหลืออยู่บริเวณตรงกลางก้อนโด ไม่เพียงพอที่ช่วยให้เม็ดแป้งสามารถเกิดเจลาติไนเซชันได้

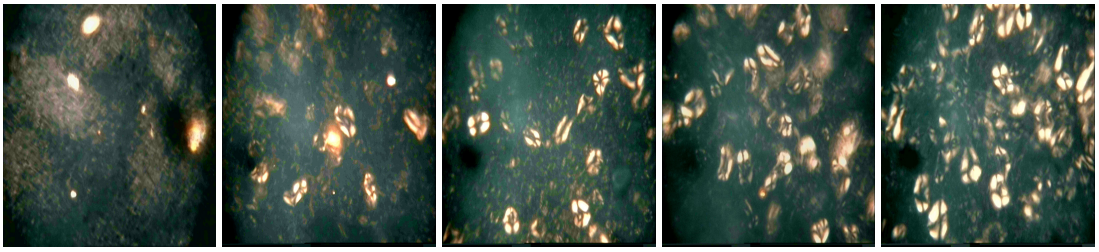
จากการศึกษาของ Kyaw และคณะ (2001b) พบว่าข้าวเกรียบที่มีเนื้อปลาอยู่ร้อยละ 0 และ 10 ไม่สามารถเกิดเจลาติไนเซชันได้อย่างสมบูรณ์ภายหลังการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°ซ นานถึง 100 นาที ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบปริมาณความชื้นระหว่างบริเวณจุดกึ่งกลางและส่วนด้านนอกของก้อนโดข้าวเกรียบ พบว่ากรณีที่ไม่มีเนื้อปลาหรือมีเนื้อปลาผสมอยู่เพียงร้อยละ 10 ปริมาณความชื้นมีความแตกต่างกัน กล่าวคือความชื้นจุดกึ่งกลางมีปริมาณน้อยกว่าส่วนด้านนอกของก้อนโดข้าวเกรียบ ทั้งนี้เนื่องจากมีการสูญเสียโมเลกุลของน้ำจากภายในก้อนโดของข้าวเกรียบออกสู่ภายนอกในระหว่างการนึ่ง อาจมีผลทำให้ปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดเจลาติไนเซชันโดยสมบูรณ์ได้

(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

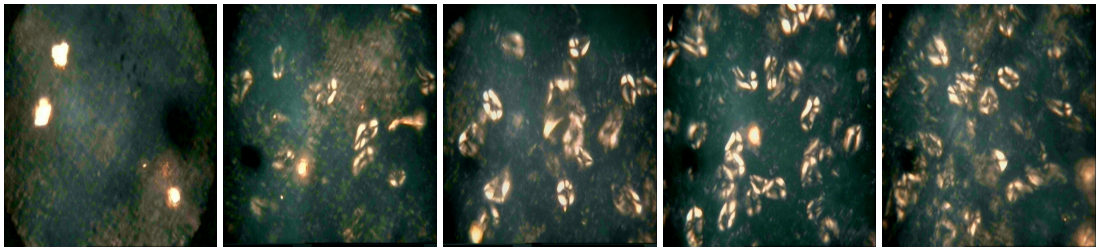


Cassava starch 6% Sago starch 12% Sago starch 18% Sago starch 24% Sago starch

ภาพที่ 14 ลักษณะมอลตีสครอสของโดข้าวเกรียบที่ยังไม่ผ่านการทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24 ภายหลังการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°ซ ระยะเวลานาน 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) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ระนาบแสงโพลาไรซ์ที่กำลังขยาย 400 เท่า

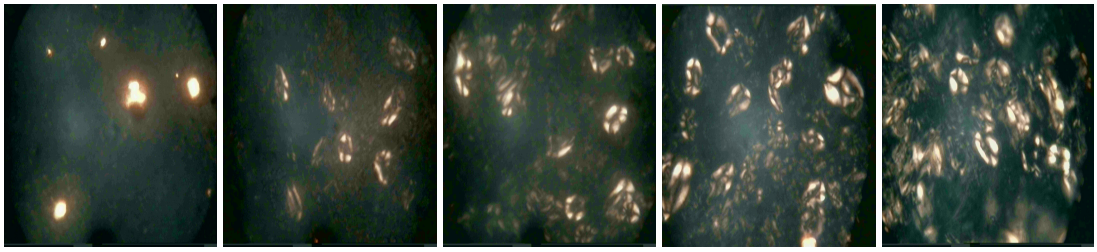
Maltese cross characteristic of cracker dough produced from the mixture between cassava and sago starches with different levels of sago starch added (0, 6, 12, 18 and 24%) steamed at 100°C for 25 min (a), 35 min (b), 45 min (c), 60 min (d), 75 min (e), 90 min (f), 105 min (g), 120 min (h) under polarized light microscope (x400)

(c) Steaming time for 45 min



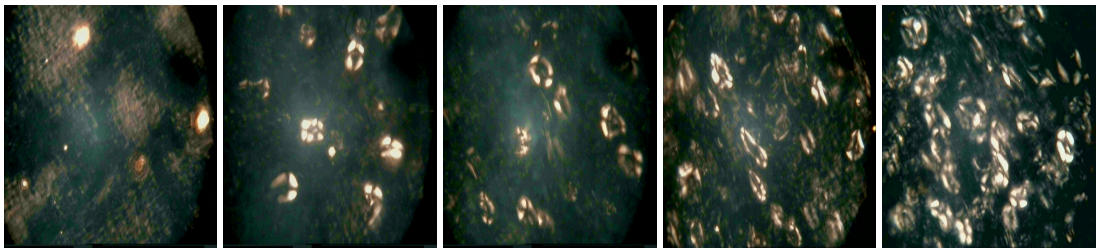
Cassava starch 6% Sago starch 12% Sago starch 18% Sago starch 24% Sago starch

(d) Steaming time for 60 min



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

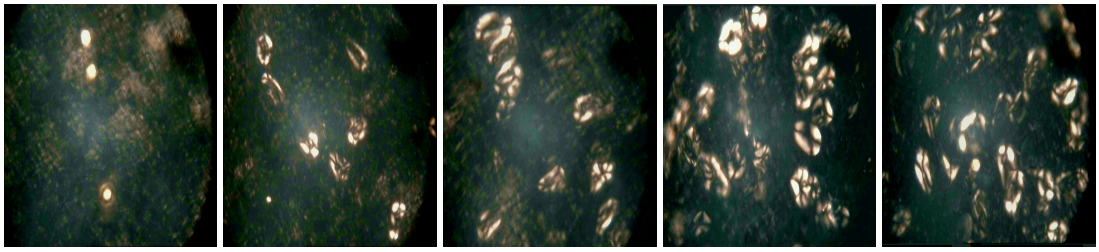
(e) Steaming time for 75 min



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

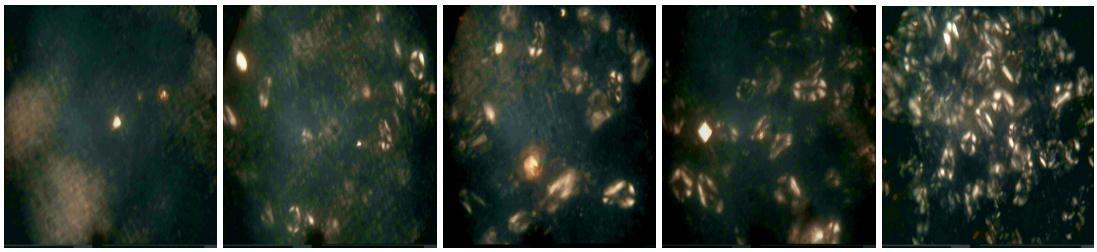
ภาพที่ 14 (ต่อ)

(f) Steaming time for 90 min



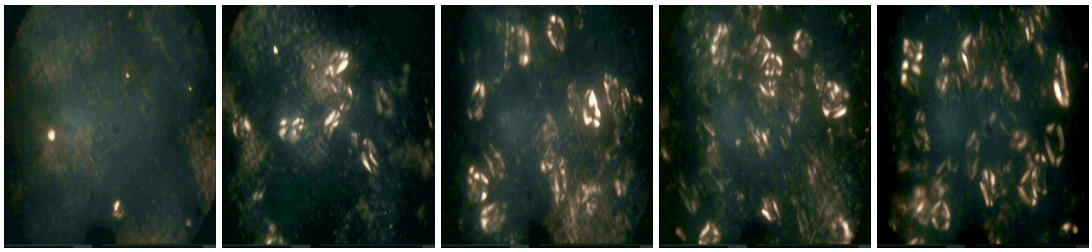
Cassava starch 6% Sago starch 12% Sago starch 18% Sago starch 24% Sago starch

(g) Steaming time for 105 min



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

(h) Steaming time for 25 min



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

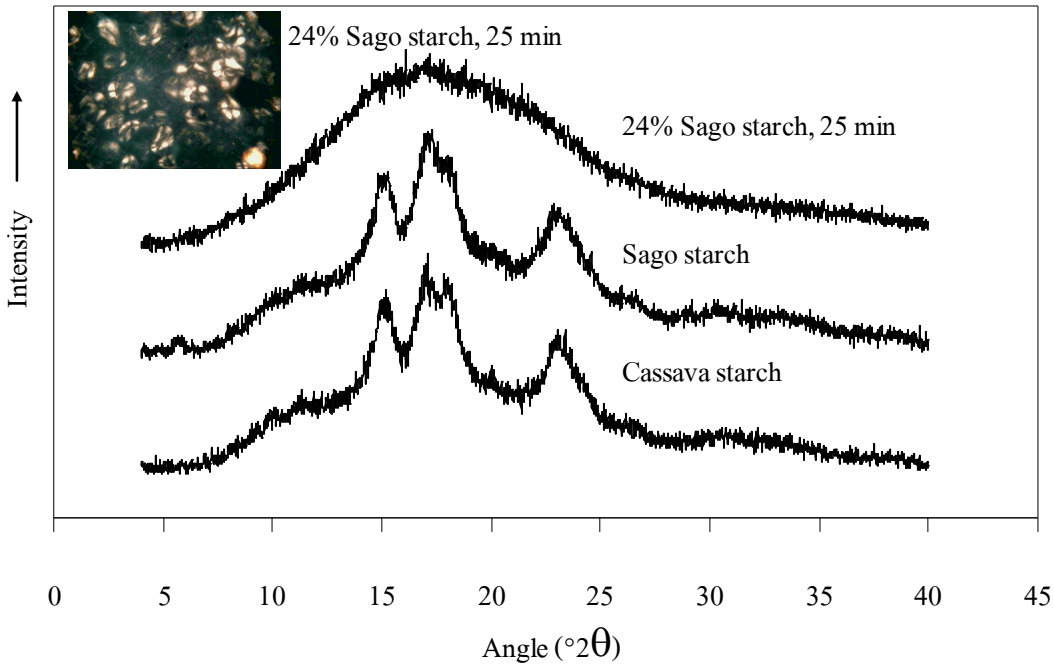
ภาพที่ 14 (ต่อ)

3.1.2 รูปแบบโครงสร้างผลึกของข้าวเกรียบแป้งผสม

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD นอกจากจะใช้ตรวจสอบชนิดของโครงสร้างผลึกในแป้งดิบแล้วยังสามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกในเม็ดแป้งอันเป็นผลจากการแปรรูปได้ ในตัวอย่างแป้งดิบพีคที่ปรากฏให้เห็นจะบ่งบอกถึงความเป็นผลึกของโครงสร้างเม็ดแป้ง และภายหลังแป้งเกิดเจลาติไนเซชันโดยสมบูรณ์เป็นผลให้โครงสร้างผลึกถูกทำลายเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) โดยจะไม่ปรากฏพีคดังกล่าวที่พบในแป้งดิบ (Slade, 1984; Zobel *et al.,* 1988) จากการทดลองวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของข้าวเกรียบแป้งผสมก่อนการทอดที่มีปริมาณแป้งสาคูร้อยละ 0-24 ภายหลังผ่านการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°ซ เป็นเวลานาน 25-120 นาที โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงรูปแบบผลึกจากลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A ที่พบในแป้งดิบทั้ง 2 ชนิดของแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูกับข้าวเกรียบแป้งผสมก่อนการทอดโดยเลือกชุดการทดลองที่มีปริมาณแป้งสาคูมากที่สุด (ร้อยละ 24) และระยะเวลานึ่งน้อยที่สุด (25 นาที) ทั้งนี้เนื่องจากผลการวิเคราะห์ลักษณะมอลตีสครอสภายใต้กล้องจุลทรรศน์ระนาบแสงโพลาไรซ์ พบว่าสามารถสังเกตเห็นลักษณะมอลตีสครอสได้ชัดเจนที่ระยะเวลานึ่งน้อยและลักษณะดังกล่าวเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณแป้งสาคูเพิ่มขึ้น ดังผลในข้อ 3.1.1 ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่าเม็ดแป้งในโดของข้าวเกรียบแป้งผสมเกิดการเจลาติไนเซชันที่ไม่สมบูรณ์และมีโครงสร้างผลึกบางส่วนที่ยังไม่ถูกทำลาย ซึ่งเมื่อตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ A ที่พบในแป้งดิบ ซึ่งให้พีคที่ 15, 17, 18 และ 23°2θ เปลี่ยนเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐานและไม่ปรากฏพีคใดๆ ที่แสดงถึงความเป็นผลึก ดังภาพที่ 15 ซึ่งแสดงว่าโครงสร้างผลึกถูกทำลายโดยความร้อนในระหว่างการนึ่ง ซึ่งกรณีของข้าวเกรียบแป้งผสมก่อนทอดที่มีปริมาณแป้งสาคูร้อยละ 24 และระยะเวลานึ่งนาน 25 นาที เป็นชุดการทดลองที่ระยะเวลานึ่งน้อยที่สุด พบว่าไม่มีพีคของโครงสร้างผลึกปรากฏอยู่เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบที่มีลักษณะของการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกแบบ A แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผลึกของแผ่นข้าวเกรียบถูกทำลายทำให้จึงไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง XRD ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างผลึกของข้าวเกรียบแป้งผสมในชุดการทดลองที่มีปริมาณของแป้งสาคูน้อยกว่า (ร้อยละ 6, 12 และ 18) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งดิบผสมแบบ A เหมือนกัน และเมื่อผ่านการทำให้สุกโดยการนึ่งที่ระยะเวลานานขึ้น (35-120 นาที) ความร้อนอาจมีผลให้โครงสร้างผลึกและโครงสร้างโมเลกุลของเม็ดแป้งถูกทำลายเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังนั้นอาจส่งผลให้ลักษณะโครงสร้างผลึกของข้าวเกรียบแป้งผสมก่อนทอดในชุดการทดลองดังกล่าว มีการเปลี่ยนแปลงจากลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A ที่พบในแป้งดิบผสมเปลี่ยนเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐานไม่แตกต่างกัน

ซึ่งผลการวิเคราะห์จากเครื่อง XRD ไม่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ลักษณะมอลตีสครอสของข้าวเกรียบแป้งผสมก่อนทอด โดยทั่วไปการที่แป้งดิบมีความสามารถในการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์เป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวอย่างมีระเบียบของโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างผลึกภายในเม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งมีคุณสมบัติในการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ เมื่อส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์ระนาบแสงโพลาไรซ์ (Hoseney, 1994) ดังนั้นข้าวเกรียบแป้งผสมภายหลังการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°ซ การที่เม็ดแป้งตรงกึ่งกลางก้อนโดของข้าวเกรียบแป้งผสมยังมีความสามารถในการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์อยู่ แสดงให้เห็นว่าอาจจะมีโครงสร้างผลึกบางส่วนของเม็ดแป้งยังไม่ถูกทำลายในระหว่างนึ่งด้วยไอน้ำ ทำให้เม็ดแป้งไม่สามารถเกิดเจลาติไนเซชันได้สมบูรณ์

หากเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD นี้กับการวิเคราะห์ลักษณะมอลตีสครอสของข้าวเกรียบแป้งผสมก่อนในชุดการทดลองเดียวกัน (ภาพที่ 15) พบว่าชุดการทดลองดังกล่าวยังแสดงให้เห็นลักษณะมอลตีสครอสซึ่งแสดงถึงความเป็นผลึก ในผลการทดลองนี้จึงอาจกล่าวได้ว่าการใช้เทคนิค XRD ในการตรวจสอบการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งมีความเหมาะสมและให้ผลที่ถูกต้องน้อยกว่าการใช้กล้องจุลทรรศน์ระนาบแสงโพลาไรซ์ ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่ามีความขัดแย้งกันระหว่างผลการตรวจวิเคราะห์รูปแบบของโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD และการตรวจสอบคุณสมบัติในการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ ดังนั้น จึงวิเคราะห์ระดับของการเกิดเจลาติไนเซชันด้วยเครื่อง DSC เพื่อการยืนยันผลของกระบวนการเกิดเจลาติไนเซชันของข้าวเกรียบ (Donovan, 1979)



ภาพที่ 15 รูปแบบโครงสร้างผลึกของแป้งดิบ (แป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคู) และข้าวเกรียบที่ยังไม่ผ่านการทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 24

X-ray diffractograms of native (cassava and sago starches) and raw cracker produced from the mixture between cassava and sago starches with different levels of sago starch added (24%)

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

3.1.3 ระดับของการเกิดเจลาติไนเซชัน

การตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC เป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถตรวจสอบกระบวนการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งได้ โดยทั่วไปแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนจะไม่พบพีคการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งหากเมื่อกระบวนเกิดเจลาติไนเซชันเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ (Atwell *et al.,* 1988; Donovan, 1979; Eliasson and Gudmundsson, 1996) ผลจากการวิเคราะห์ระดับของการเกิดเจลาติไนเซชันของแผ่นข้าวเกรียบแป้งผสม เมื่อมีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24 ภายหลังผ่านการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°ซ เป็นเวลานาน 25-120 นาที สุดท้ายนำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 55-60°ซ เป็นเวลา 3-4 ชั่วโมง พบว่าเทอร์โมแกรม DSC ของข้าวเกรียบ

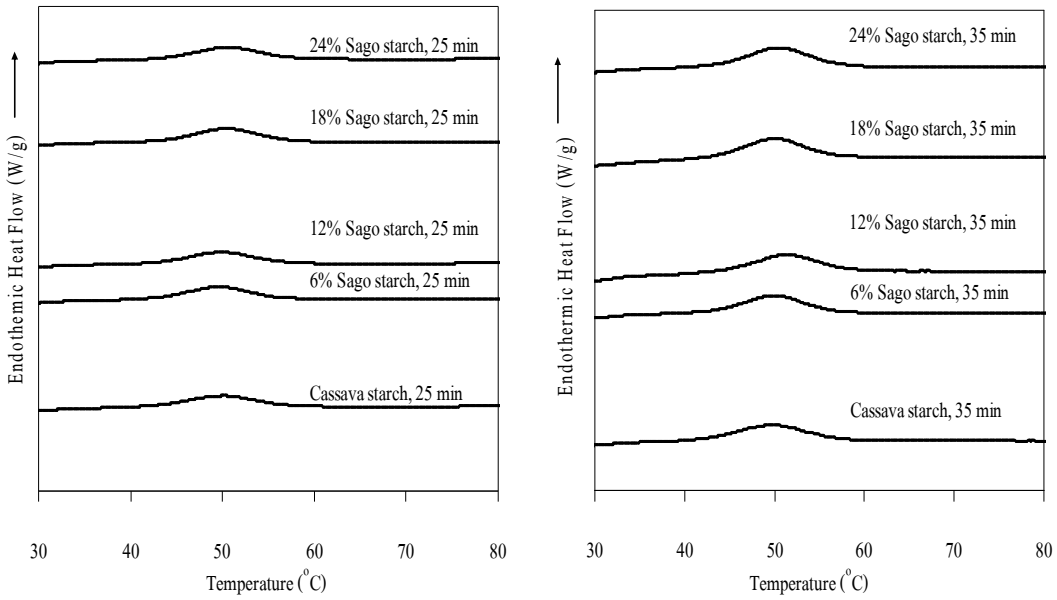
แป้งผสมในทุกชุดการทดลองจะปรากฏพีคของการเกิดเจลาติไนเซชันดังแสดงในภาพที่ 16a-16h โดยมีค่า T_O, T_P และ T_C อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 41.00-44.44, 49.17-50.92 และ 56.05-60.96°ซ ตามลำดับ (ตารางที่ 8) นอกจากนี้มีค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชันอยู่ระหว่าง 2.46-6.69 จูลต่อกรัม โดยอุณหภูมิและพลังงานเอนทัลปี (ΔH) ที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชันจะลดลงในทุกชุดการทดลอง เมื่อระยะเวลาในการนึ่งเพิ่มขึ้น แต่มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองของแป้งผสมดิบ ซึ่งมีอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 62.67-78.55°ซ และมีค่าพลังงานในการเกิดเจลาติไนเซชันอยู่ระหว่าง 13.53-15.08 จูลต่อกรัม

เมื่อพิจารณาระดับของการเกิดเจลาติไนเซชัน (Degree of gelatinization) ของข้าวเกรียบแป้งผสมที่ปริมาณแป้งสาคูและระยะเวลาการนึ่งต่างกัน (ภาพที่ 17) โดยเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานในการเกิดเจลาติไนเซชันของข้าวเกรียบแป้งผสมกับค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งดิบ พบว่าปริมาณของแป้งสาคูและระยะเวลาการนึ่งที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อระดับการเกิดเจลาติไนเซชันของข้าวเกรียบแป้งผสมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางภาคผนวกที่ 6) โดยที่ระดับของการเกิดเจลาติไนเซชันมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 55.46-83.12 (ตารางที่ 9) ปริมาณของแป้งสาคูในแป้งผสมที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระดับการเกิดเจลาติไนเซชันของข้าวเกรียบแป้งผสมมีแนวโน้มลดลง ระยะเวลาในการนึ่งก็มีผลต่อระดับของการเกิดเจลาติไนเซชัน คือเมื่อเพิ่มระยะเวลาการนึ่งนานขึ้น ส่งผลให้ระดับการเกิดเจลาติไนเซชันของข้าวเกรียบแป้งผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะโครงสร้างโมเลกุลของเม็ดแป้งถูกทำลายมากขึ้น จึงส่งผลให้ระดับของการเกิดเจลาติไนเซชันเพิ่มขึ้น บ่งชี้ให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลานึ่งนานขึ้นจะมีผลทำให้ข้าวเกรียบแป้งผสมมีระดับของการสุกเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งในช่วงระยะเวลานึ่งนาน 25-60 นาที พบว่าระดับการเกิดเจลาติไนเซชันของข้าวเกรียบแป้งผสมมีค่าเพิ่มขึ้น โดยข้าวเกรียบทุกชุดการทดลองที่ระยะเวลานึ่งนาน 60 นาที มีระดับการเกิดเจลาติไนเซชันแตกต่างกับที่ระยะเวลานึ่งนาน 45 นาที อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางภาคผนวกที่ 6) แต่อย่างไรก็ตามภายหลังให้ระยะเวลานึ่งนานขึ้น 75-120 นาที พบว่าระดับการสุกของข้าวเกรียบแป้งผสมของกลุ่มชุดการทดลองที่ระยะเวลาการนึ่งนาน 60-120 นาที ไม่มีความแตกต่างกัน

จากผลการวิเคราะห์ระดับของการเกิดเจลาติไนเซชันของของข้าวเกรียบแป้งผสมด้วยเครื่อง DSC ที่ได้ แสดงให้เห็นว่ายังมีโครงสร้างผลึกบางส่วนที่ไม่ถูกทำลาย จึงทำให้ข้าวเกรียบแป้งผสมแสดงสมบัติในการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ปรากฏออกมา โดยเมื่อพิจารณาอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งดิบผสม (62.76-78.55°ซ) จะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งมันสำปะหลัง (62.67-76.15°ซ) ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งสาคูในแป้งผสมดิบมีค่าสูง (66.85-79.10°ซ) จึงทำให้อุณหภูมิสุดท้ายของ

การเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งผสมดิบมีค่าเพิ่มขึ้น และยังส่งผลให้ช่วงของอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันมีค่ากว้างขึ้นด้วย โดยเมื่อยิ่งเพิ่มปริมาณแป้งสาคูมากขึ้น อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งผสมดิบก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทำให้ในระหว่างการนึ่งก้อนโดของข้าวเกรียบแป้งผสม จึงอาจเกิดสภาวะของการแข่งขันกันในการแย่งจับโมเลกุลของน้ำเพื่อใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชัน ทั้งนี้อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งมันสำปะหลังที่ต่ำกว่าแป้งสาคู จึงสามารถเกิดเจลาติไนเซชันได้ก่อนแป้งสาคูและน้ำส่วนใหญ่ในระบบถูกดูดซับ แป้งสาคูซึ่งเกิดเจลาติไนเซชันได้ช้ากว่าจึงอาจจะไม่มีโมเลกุลน้ำเพียงพอในการเกิดเจลาติไนเซชัน ส่งผลให้มีเม็ดแป้งสาคูบางส่วนไม่สามารถเกิด เจลาติไนเซชันได้ โดของข้าวเกรียบแป้งผสมจึงไม่สุกอย่างสมบูรณ์ และมีผลทำให้ระดับของการเกิดเจลาติไนเซชันของโดข้าวเกรียบแป้งผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของแป้งสาคูเพิ่มขึ้น ถึงแม้ระยะเวลาการนึ่งจะนานขึ้นถึง 120 นาทีก็ตาม

ดังนั้นผลวิเคราะห์ระดับการเกิดเจลาติไนเซชันโดยใช้เครื่อง DSC ในตัวอย่างข้าวเกรียบ จึงมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สมบัติของการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ในก้อนโดของข้าวเกรียบแป้งผสม แสดงให้เห็นว่าข้าวเกรียบแป้งผสมเกิดเจลาติไนเซชันได้ไม่สมบูรณ์ ในขณะที่เมื่อวิเคราะห์ความเป็นผลึกของข้าวเกรียบแป้งผสมด้วยเทคนิค XRD ให้ผลที่แตกต่างไป คือไม่พบความเป็นผลึกของตัวอย่าง เทคนิคดังกล่าวจึงไม่มีความเหมาะสมต่อการตรวจในการศึกษาครั้งนี้ ทั้งนี้เนื่องจากความร้อนจากการนึ่งด้วยไอน้ำอาจจะทำลายโครงสร้างโมเลกุลของแป้งถึงระดับที่ไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค XRD

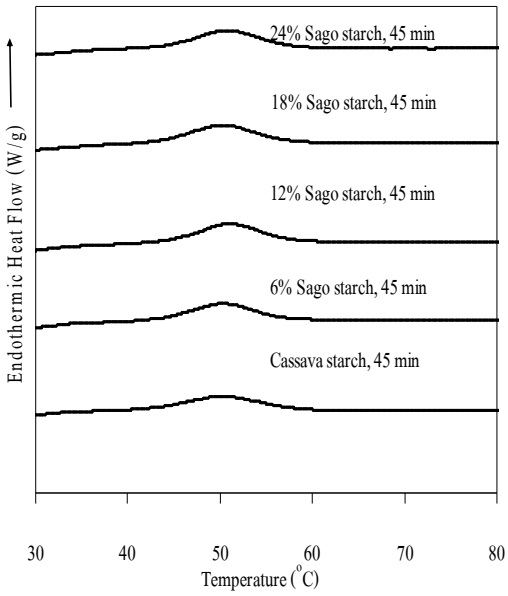


(a) **(b)**

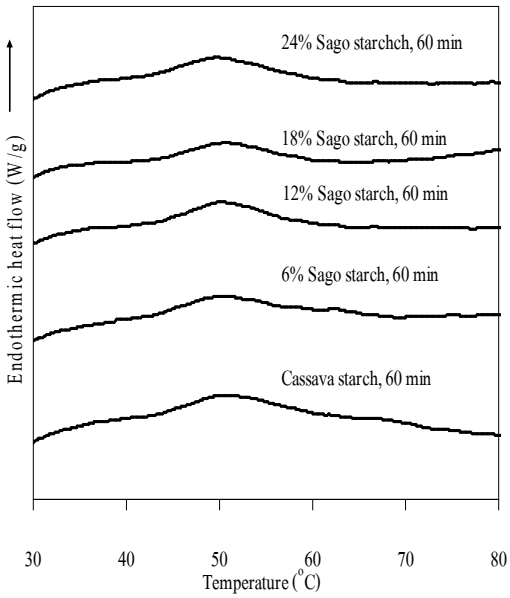
ภาพที่ 16 ลักษณะเทอร์โมแกรมจาก DSC ของข้าวเกรียบที่ยังไม่ผ่านการทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24 ภายหลังการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°ซ ระยะเวลานาน 25 นาที (a), 35 นาที (b), 45 นาที (c), 60 นาที (d), 75 นาที (e), 90 นาที (f), 105 นาที (g) และ 120 นาที (h)

The thermograms of raw cracker produced from the mixture between cassava and sago starches with different levels of sago starch added (0, 6, 12, 18 and 24%) steamed at 100°C for 25 min (a), 35 min (b), 45 min (c), 60 min (d), 75 min (e), 90 min (f), 105 min (g), 120 min (h)

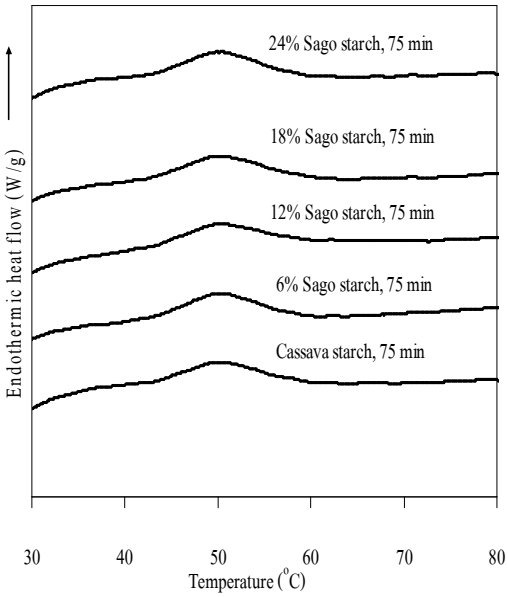
Note: All raw crackers were prepared by steaming the starch mixtures at 100°C for 25-120 min, followed by drying at 55-60°C for 3-4 h.



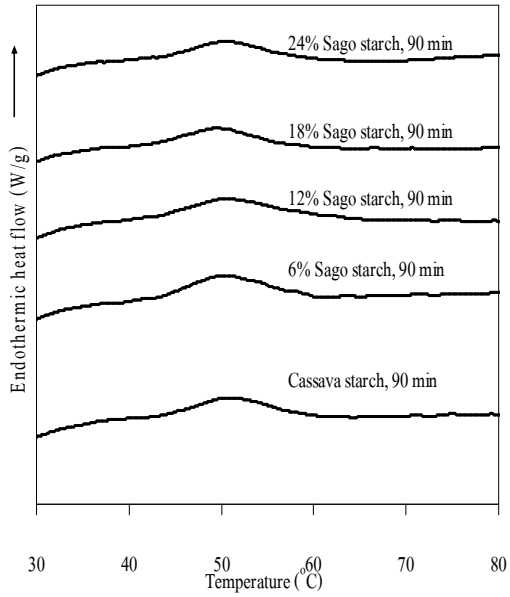
(c)



(d)

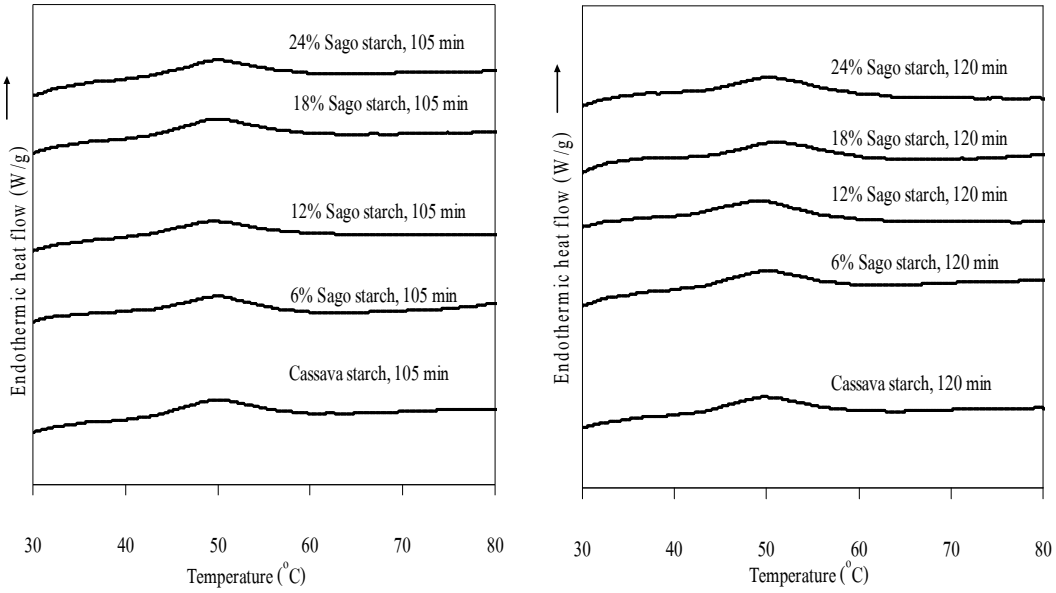


(e)



(f)

ภาพที่ 16 (ต่อ)



(g) **(h)**

ภาพที่ 16 (ต่อ)

จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าในระบบของข้าวเกรียบที่มีแป้งเพียงอย่างเดียว เม็ดแป้งไม่สามารถจะเกิดเจลาติไนเซชันได้อย่างสมบูรณ์แม้ว่าระยะเวลาในการนึ่งนานถึง 2 ชั่วโมง ทั้งนี้ปรากฏการณ์ดังกล่าวอาจแตกต่างไปถ้ามีส่วนผสมอื่นร่วมอยู่ด้วย เช่น มีโปรตีนจากปลา เกลือ หรือน้ำตาล เป็นต้น จากรายงานของ Kyaw และคณะ (2001b) ที่ศึกษาผลของปริมาณเนื้อปลาที่ร้อยละ 0, 10, 15, 30 และ 50 พบว่าเม็ดแป้งตรงกึ่งกลางก้อนโดของข้าวเกรียบที่มีปริมาณเนื้อปลาร้อยละ 0 และ 10 ภายหลังนึ่งเป็นระยะเวลานาน 100 นาที เกิดการเจลาติไนเซชันได้ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากในระหว่างการนึ่งโมเลกุลของน้ำเกิดการเคลื่อนย้ายออกจากส่วนตรงกลางออกสู่ด้านนอกของก้อนโดข้าวเกรียบ ประกอบกับส่วนรอบนอกของก้อนโดจะได้รับความร้อนสูงก่อนส่วนตรงกลางของก้อนโด ทำให้เม็ดแป้งบริเวณรอบนอกของก้อนโดซึ่งมีปริมาณน้ำและรับความร้อนได้สูงเกิดเจลาติไนเซชันได้ก่อน ในขณะที่ส่วนตรงกลางที่ไม่สามารถเกิดเจลาติไนเซชันได้ เนื่องจากมีการสูญเสียความชื้นจากส่วนด้านนอก ทำให้ไม่มีน้ำเพียงพอที่จะใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชัน อย่างไรก็ตามพบว่าเม็ดแป้งในก้อนโดของข้าวเกรียบจะเกิดเจลาติไนเซชันได้อย่างสมบูรณ์เมื่อมีปริมาณของเนื้อปลาอยู่ร้อยละ 15 และปริมาณแป้งร้อยละ 85 ในระยะเวลานึ่งเพียง 30 นาที ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณของเนื้อปลาตั้งแต่ร้อยละ 15 ขึ้นไป มีผลทำให้โครงสร้างร่างแหของโปรตีนจากเนื้อปลาเริ่มพัฒนาขึ้น และส่งผลให้ความสามารถในการอุ้มน้ำของก้อนโดมีค่าเพิ่มขึ้น

โดยโปรตีนจากเนื้อปลาจะยึดจับโมเลกุลของน้ำในก้อนโดข้าวเกรียบไว้ภายในโครงสร้างร่างแหของเจลโปรตีนจากเนื้อปลา ทำให้กำจัดการเคลื่อนย้ายและลดการสูญเสียของโมเลกุลน้ำในระหว่างการนึ่ง ทำให้มีน้ำเพียงพอที่จะช่วยให้แป้งเกิดเจลาติไนเซชันได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของระบบที่มีโปรตีน แป้งและน้ำภายในก้อนโดของข้าวเกรียบ เนื่องจากโปรตีนมีความสามารถในการดูดซับกับน้ำได้ดีกว่าแป้ง เมื่อได้รับความร้อนมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนในการเกิดเจลก่อนกระบวนการเจลาติไนเซชันของแป้ง โดยระหว่างการเกิดเจลเนื่องจากความร้อนโมเลกุลของน้ำจะถูกยึดจับกับโครงสร้างของเจลโปรตีน ทำให้เกิดเจลที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบร่างแหของโปรตีนซึ่งมีโมเลกุลของน้ำที่ถูกจับอยู่ภายในโครงสร้างของเจล ทำให้โมเลกุลของน้ำไม่สามารถเคลื่อนที่ออกมาภายนอกได้โดยง่ายในระหว่างการนึ่ง โดยอนุภาคของแป้งที่แทรกตัวอยู่ในช่องว่างโครงสร้างร่างแหของเจลโปรตีนจะเกิดเจลาติไนเซชันได้รับความชื้นและความร้อนที่เหมาะสม ซึ่งเมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพของโปรตีน (Denature) ทำให้เกิดการรวมตัวกันของโปรตีน มีผลให้สูญเสียความสามารถในการยึดจับกับโมเลกุลของน้ำให้กับแป้ง โมเลกุลของน้ำจึงหลุดออกมาภายนอกโครงสร้างของโปรตีน และโมเลกุลของน้ำจะถูกนำมาใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้ง ซึ่งเป็นผลให้เม็ดแป้งเริ่มเกิดเจลาติไนเซชันและเกิดการพองตัวขึ้น โดยเม็ดแป้งจะดูดซับโมเลกุลของน้ำที่ถูกปล่อยออกมาบริเวณรอบนอกของโครงสร้างร่างแหของเจลโปรตีนมาช่วยให้การเกิดเจลาติไนเซชันได้อย่างสมบูรณ์ (Wu *et al.,* 1985)

จากการศึกษาของ Cheow และ Yu (1997) พบว่าหากมีปริมาณของเนื้อปลาน้อยเกินไปมีผลให้กึ่งกลางของก้อนโดข้าวเกรียบเกิดเจลาติไนเซชันไม่สมบูรณ์ เนื่องจากไม่มีน้ำเพียงพอในการเกิดเจลาติไนเซชัน โดยอาจจะเป็นผลจากการเคลื่อนย้ายของโมเลกุลน้ำในระหว่างการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้ง (Ghiasi *et al.,* 1982) ซึ่งการผสมเนื้อปลาในแป้งจะทำให้มีโมเลกุลของน้ำจำนวนมากถูกตรึงไว้กับโครงสร้างของโปรตีนทำให้โมเลกุลของน้ำไม่สามารถเคลื่อนย้ายออกจากก้อนโดได้ง่าย นอกจากนี้การเติมเกลือลงในข้าวเกรียบจะช่วยให้เม็ดแป้งสามารถเกิดเจลาติไนเซชันได้โดยสมบูรณ์ เนื่องจากเกลือจะช่วยละลายโปรตีนออกจากกล้ามเนื้อปลาทำให้เกิดกระจายตัวของโปรตีนในระบบของแป้งและเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของโปรตีน มีผลทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถเข้าไปตรึงอยู่ภายในโครงสร้างแบบร่างแหของโปรตีนได้มากขึ้น ซึ่งการที่ผสมเนื้อปลาและเติมเกลือลงไปในข้าวเกรียบจะมีอิทธิผลทำให้อุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งเลื่อนสูงขึ้น โดยพบว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งมันสำปะหลังในข้าวเกรียบที่มีเนื้อปลาร้อยละ 50 และเกลือร้อยละ 2 อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 70-85°ซ

ในกระบวนการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้ง น้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่มีบทบาทช่วยให้เกิดการเจลาติไนเซชันของแป้งในก้อนโดของข้าวเกรียบ ดังนั้นในระหว่างการเกิดเจลของโปรตีน

การที่โมเลกุลของน้ำจะถูกยึดจับและเคลื่อนที่อยู่ภายในโครงสร้างร่างแหของโปรตีน ทำให้โมเลกุลของน้ำที่นำมาใช้เพื่อให้เกิดการเจลาติไนเซชันของแป้งถูกจำกัด ซึ่งอาจส่งผลให้อุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาของ Kyaw และคณะ (1999) พบว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในระบบของก้อนโดข้าวเกรียบ ที่มีปริมาณของปลาต่อแป้งเป็นอัตราส่วน 1 ต่อ 1, เกลือร้อยละ 2, น้ำตาลร้อยละ 1 และโมโนโซเดียมกลูตาเมต ร้อยละ 0.1 เป็นองค์ประกอบนั้น เมื่อได้รับความร้อนในระหว่างการนึ่งอุณหภูมิที่จุดตรงกึ่งกลางก้อนโดของข้าวเกรียบจะสูงถึง 92°ซ ภายหลังการนึ่งนานเพียง 20 นาที ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวสูงกว่าอุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งที่ผสมในก้อนโดของข้าวเกรียบ ดังนั้นในระบบของข้าวเกรียบดังกล่าวเมื่อให้ระยะเวลาในการนึ่งนาน 20 นาที ก็มีผลทำให้ตรงกึ่งกลางภายในก้อนโดของข้าวเกรียบสามารถเกิดเจลาติไนเซชันได้โดยสมบูรณ์

ตารางที่ 8 อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันและพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชันของข้าวเกรียบที่ยังไม่ผ่านการทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

Gelatinization temperature and enthalpy of raw cracker produced from the mixture between cassava and sago starches with different levels of sago starch added (0, 6, 12, 18 and 24%)

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

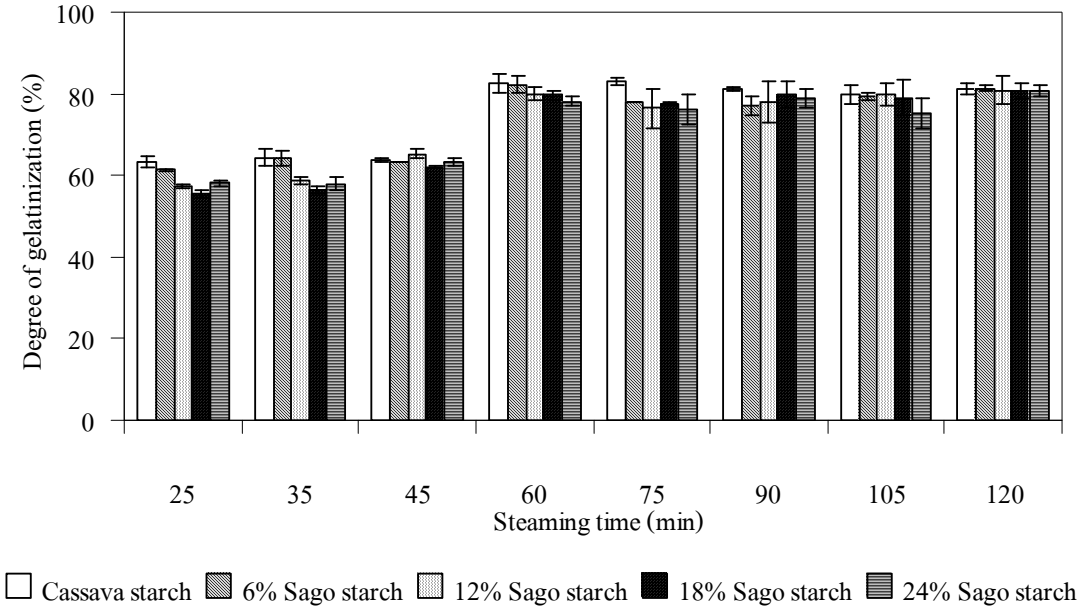
Note: Each value is the mean of duplicate ± SD.

T_O : Onset temperature; T_C : Conclusion temperature; ΔH: Enthalpy (J/g of dry wt.)

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 8 (ต่อ)

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



ภาพที่ 17 ระดับของการเกิดเจลาติไนเซชันของข้าวเกรียบที่ยังไม่ผ่านการทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

Degree of gelatinization of raw cracker produced from the mixture between cassava and sago starches with different levels of sago starch added (0, 6, 12, 18 and 24%)

Note: 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 9 ระดับของการเกิดเจลาติไนเซชันของข้าวเกรียบที่ยังไม่ผ่านการทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

Degree of gelatinization of raw cracker produced from the mixture between cassava and sago starches with different levels of sago starch added (0, 6, 12, 18 and 24%)

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

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.

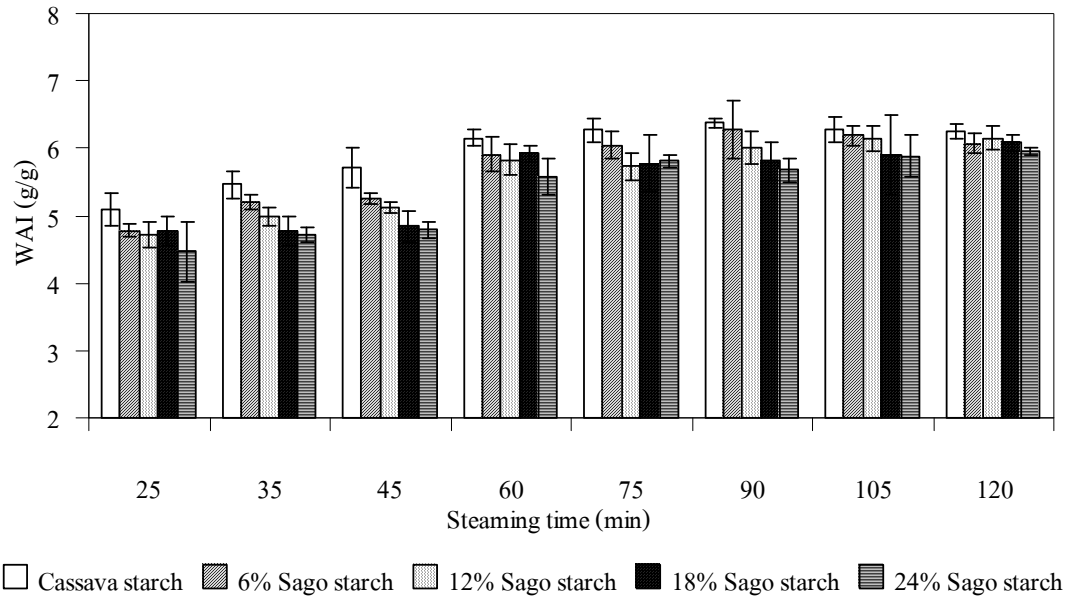
3.1.4 ความสามารถในการดูดซับและละลายน้ำของข้าวเกรียบแป้งผสม

ผลจากการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับน้ำของแผ่นข้าวเกรียบแป้งผสมแห้งที่มีปริมาณแป้งสาคูร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24 ภายหลังการนึ่งด้วยไอน้ำเป็นระยะเวลานาน 25-120 นาที พบว่าปริมาณของแป้งสาคูในแป้งผสมและระยะเวลานึ่งที่แตกต่างกันมีผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำของข้าวเกรียบแป้งผสมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางภาคผนวกที่ 7) โดยเมื่อปริมาณแป้งสาคูเพิ่มขึ้น มีผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง ขณะที่ระยะเวลานึ่งนานขึ้นมีผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำของข้าวเกรียบแป้งผสมเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 18) จากตารางที่ 10 พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของแผ่นข้าวเกรียบแห้งที่ระยะเวลานึ่งนาน 25, 35 และ 45 นาที มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการนึ่งเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับชุดการทดลองที่ระยะเวลานึ่งนาน 60, 75, 105 และ 120 นาที ความสามารถในการดูดซับน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อให้ระยะเวลาการนึ่งนานขึ้น แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกัน พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของทั้ง 2 กลุ่มดังกล่าวมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่อย่างไรก็ตามพบว่าความสามารถในการดูดซับน้ำของชุดการทดลองข้าวเกรียบแป้งผสมที่มีปริมาณแป้งสาคูร้อยละ 0 (มีเฉพาะแป้งมันสำปะหลัง) และ 6 มีแนวโน้มลดลง เมื่อระยะเวลานึ่งนาน 105 และ 120 นาที

ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการละลายน้ำของแผ่นข้าวเกรียบแป้งผสมก่อนทอดพบว่า ปริมาณแป้งสาคูและระยะเวลาการนึ่งมีผลต่อความสามารถในการละลายน้ำของข้าวเกรียบอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางภาคผนวกที่ 8) กล่าวคือเมื่อปริมาณแป้งสาคูเพิ่มขึ้นมีผลให้ความสามารถในการละลายน้ำลดลง ขณะที่ระยะเวลาการนึ่งที่เพิ่มขึ้น มีผลให้ความสามารถในการละลายน้ำของข้าวเกรียบแป้งผสมมีค่าเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 11 และภาพที่ 19) โดยมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 5.71-17.36

จากการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับน้ำ และการละลายน้ำของแป้งที่อุณหภูมิห้อง ในสภาวะที่มีน้ำมากเกินพอ เป็นวิธีการวิเคราะห์ระดับการเปลี่ยนแปลงของแป้งในระหว่างกระบวนการแปรรูป ซึ่งค่าจะสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับระดับการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งและการแตกหักของโมเลกุล แป้งที่เกิดเจลาติไนเซชันอย่างสมบูรณ์และมีการแตกหักของโมเลกุลน้อยที่สุด ส่งผลให้ค่า WAI สูง สำหรับค่า WSI เป็นค่าที่วัดการละลายของโมเลกุลอิสระที่ถูกปลดปล่อยจากเม็ดแป้งในระหว่างการเกิดเจลาติไนเซชัน ซึ่งบ่งบอกถึงระดับการเกิดเจลาติไนเซชันและการแตกหักของโมเลกุลแป้ง ซึ่งหากมีการแตกหักของโมเลกุลสูง ส่งผลให้เกิดการละลายได้ดีขึ้นและค่า WSI ก็จะสูง (Aderson *et al.,* 1969; Colonna *et al.,* 1987; Olett *et al.,* 1990; Sriburi *et al.,* 1999) ซึ่งจากผลการทดลองนี้สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อปริมาณแป้งสาคูเพิ่มขึ้น มีผลให้ระดับการ

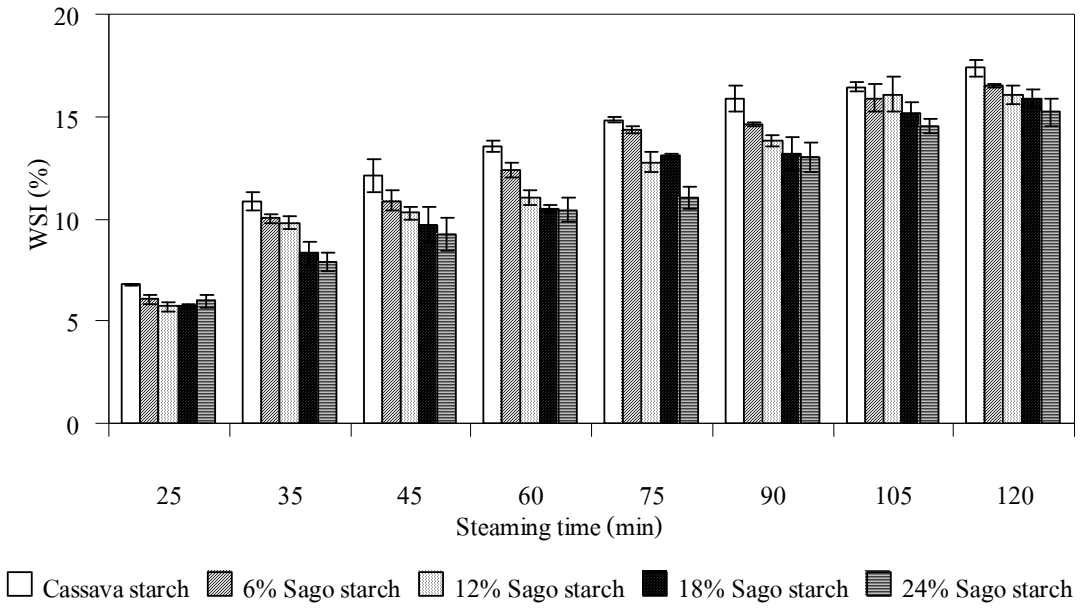
เกิดเจลาติไนเซชันของข้าวเกรียบแป้งผสมต่ำลง จึงส่งให้ความสามารถในการดูดซับและละลายน้ำของข้าวเกรียบแป้งผสมมีค่าลดลง ขณะที่ระยะเวลานึ่งนานขึ้น พบว่ามีผลให้ระดับของการเกิดเจลาติไนเซชันสูงขึ้น ทั้งนี้เมื่อระยะเวลาในระหว่างการนึ่งนานขึ้นมีผลให้เม็ดแป้งสามารถเกิดเจลาติไนเซชันได้มากขึ้น เม็ดแป้งสามารถพองตัวและเกิดการละลายเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำและค่าการละลายมีค่าสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามมีข้อยกเว้นสำหรับชุดการทดลองที่มีแป้งมันสำปะหลังอย่างเดียวและมีปริมาณของแป้งสาคูร้อยละ 6 และระยะเวลาการนึ่งนาน 105 และ 120 นาที ซึ่งพบว่าความสามารถในการดูดซับน้ำมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากชุดการทดลองดังกล่าวประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลังทั้งหมดและเกือบทั้งหมด ซึ่งแป้งมันสำปะหลังมีอุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนเซชันต่ำกว่าแป้งสาคู ประกอบกับระยะเวลาในการให้ความร้อนที่นานขึ้น ทำให้โมเลกุลของแป้งที่หลุดออกจากเม็ดแป้งในระหว่างกระบวนการเกิดเจลาติไนเซชันเกิดการแตกหักมากขึ้นจนสูญเสียความสามารถในการดูดซับน้ำ แต่เกิดการละลายเพิ่ม ดังนั้นข้าวเกรียบแป้งผสมที่ปริมาณแป้งสาคูร้อยละ 0 และ 6 จึงมีค่าความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง และส่งผลให้ความสามารถในการละลายมีค่าสูง เมื่อให้ระยะเวลานึ่งนานขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Hashimoto และ Grossmann (2003) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิและแรงเฉือนในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันมีผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง แต่การละลายเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากเกิดการแตกหักของโมเลกุลแป้งมากขึ้น (Badire and Mellowes, 1991)



ภาพที่ 18 ความสามารถในการดูดซับน้ำของข้าวเกรียบที่ยังไม่ผ่านการทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

Water absorption index of raw cracker produced from the mixture between cassava and sago starches with different levels of sago starch added (0, 6, 12, 18 and 24%)

Note: 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.



ภาพที่ 19 ความสามารถในการละลายน้ำของข้าวเกรียบที่ยังไม่ผ่านการทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

Water soluble index of raw cracker produced from the mixture between cassava and sago starches with different levels of sago starch added (0, 6, 12, 18 and 24%)

Note: 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 10 ความสามารถในการดูดซับน้ำของข้าวเกรียบที่ยังไม่ผ่านการทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

Water absorption index of raw cracker produced from the mixture between cassava and sago starches with different levels of sago starch added (0, 6, 12, 18 and 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^{c}	5.46±0.20^{b}	5.72±0.29^{b}	6.15±0.12^{a}	6.27±0.18^{a}	6.37±0.07^{a}	6.28±0.19^{a}	6.24±0.10^{a}
6% Sago starch	4.78±0.09^{c}	5.20±0.12^{b}	5.26±0.09^{b}	5.91±0.27^{a}	6.04±0.20^{a}	6.29±0.43^{a}	6.19±0.14^{a}	6.07±0.14^{a}
12% Sago starch	4.71±0.18^{d}	4.98±0.14^{cd}	5.12±0.08^{c}	5.82±0.23^{ab}	5.73±0.20^{b}	6.01±0.23^{ab}	6.13±0.19^{a}	6.15±0.17^{a}
18% Sago starch	4.77±0.22^{b}	4.77±0.21^{b}	4.84±0.22^{b}	5.92±0.12^{a}	5.78±0.42^{a}	5.82±0.26^{a}	5.91±0.59^{a}	6.08±0.12^{a}
24% Sago starch	4.47±0.44^{b}	4.72±0.11^{b}	4.79±0.12^{b}	5.57±0.27^{a}	5.81±0.10^{a}	5.67±0.17^{a}	5.89±0.30^{a}	5.96±0.06^{a}

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 11 ความสามารถในการละลายน้ำของข้าวเกรียบที่ยังไม่ผ่านการทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

Water soluble index of raw cracker produced from the mixture between cassava and sago starches with different levels of sago starch added (0, 6, 12, 18 and 24%)

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

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.

3.2 สมบัติของข้าวเกรียบแป้งผสมหลังการทอด

นำข้าวเกรียบแป้งผสมที่เตรียมได้ตามบทที่ 2 จากการทดลองข้อ 3.1 อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 55-60°ซ โดยกำหนดให้มีความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วงร้อยละ 8-9 แล้วทอดในน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิประมาณ 190-200°ซ (โดยใช้น้ำมันปาล์ม 8 กิโลกรัมต่อข้าวเกรียบ 1,000 กรัม) เป็นระยะเวลา 25 วินาที ตั้งทิ้งไว้ให้สะเด็ดมันที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 นาที แล้วตรวจวิเคราะห์สมบัติของข้าวเกรียบแป้งผสมหลังการทอดเปรียบเทียบกับข้าวเกรียบชุดควบคุม (ข้าวเกรียบที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว) โดยสมบัติที่ศึกษา ได้แก่ อัตราการพองตัว (Expansion ratio) ลักษณะและจำนวนโพรงอากาศ (Air cell) และค่าแรงกดของเนื้อสัมผัส ผลการศึกษาเป็นดังนี้

3.2.1 อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบแป้งผสมหลังทอด

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

ปริมาณแป้งสาคูมีผลต่ออัตราการพองตัวของข้าวเกรียบแป้งผสมหลังทอดอย่างมีนัยสำคัญ โดยชุดการทดลองที่มีระยะเวลานึ่งเท่ากัน อัตราการพองตัวของชุดการทดลองที่มีแป้งสาคูร้อยละ 0 (มีเฉพาะแป้งมันสำปะหลัง) มีอัตราการพองตัวสูงสุด ขณะที่ชุดการทดลองที่มีปริมาณแป้งสาคูสูงสุด (ร้อยละ 24) มีอัตราการพองตัวต่ำที่สุด และเมื่อปริมาณของแป้งสาคูเพิ่มขึ้นจะมีผลให้อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบมีแนวโน้มลดลง (ตารางที่ 12 และภาพที่ 20) โดยผลการทดลองเป็นไปในทำนองเดียวกันในทุกระยะเวลานึ่ง ทั้งนี้เหตุผลประการแรกน่าจะเป็นผลมาจากระดับการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งผสมลดลงเมื่อสัดส่วนแป้งสาคูเพิ่มขึ้น ซึ่งผลของระดับการเกิดเจลาติไนเซชันต่ออัตราการพองตัว ดังได้กล่าวแล้วข้างต้น แม้ว่าระดับการเกิดเจลาติไนเซชันของข้าวเกรียบแป้งผสมจะลดลงเมื่อปริมาณแป้งสาคูเพิ่มขึ้นแต่ส่วนใหญ่ก็ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) เหตุผลประการที่สองอาจเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณอะมิโลสในแป้งผสม (เนื่องจากแป้งสาคูมีปริมาณอะมิโลสสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง) มีผลให้เกิดการกลับมาเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลอะมิโลสในข้าวเกรียบหลังการนึ่ง หรือเกิดรีโทรเกรเดชันสูงขึ้น (ซึ่งสอดคล้องกับ

ค่าความหนืดสุดท้ายของแป้งเปียกที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ดังภาพที่ 11) มีผลให้โครงสร้างข้าวเกรียบมีความแข็งแรงมากขึ้นและเกิดการขยายตัวได้ยากในระหว่างการทอด อัตราการพองตัวจึงต่ำกว่าชุดการทดลองที่มีปริมาณแป้งสาคู (ปริมาณอะมิโลส) ต่ำกว่า ผลการทดลองนี้ สอดคล้องกับการศึกษาของ Kyaw และคณะ (2001a) ซึ่งพบว่าเจลของข้าวเกรียบปลาที่ผลิตจากแป้งข้าวสาลี (ปริมาณอะมิโลสร้อยละ 25) เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100°ซ เป็นระยะเวลานาน 30 นาที ความแข็งแรงของเจลมีค่าสูง ส่งผลให้อัตราการพองตัวต่ำกว่าข้าวเกรียบปลาที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง (ปริมาณอะมิโลสอยู่ร้อยละ 17)

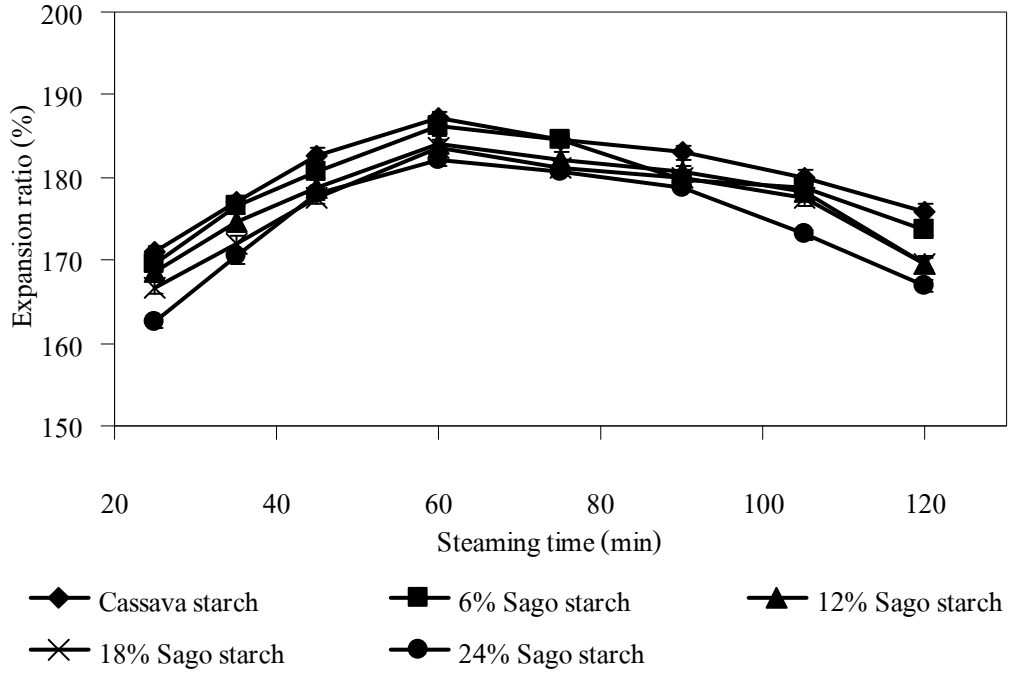
ระยะเวลาการนึ่งมีผลต่ออัตราการพองตัวของข้าวเกรียบแป้งผสมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางภาคผนวกที่ 9) โดยในชุดการทดลองที่สัดส่วนแป้งผสมเดียวกัน พบว่าข้าวเกรียบแป้งผสมทุกชุดการทดลองมีอัตราการพองตัวเพิ่มขึ้น ในช่วงระยะเวลานึ่งนาน 25-60 นาที พบว่าอัตราการพองตัวของข้าวเกรียบแป้งผสมที่ระยะเวลานึ่งนาน 60 นาที มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับชุดการทดลองที่ระยะเวลานึ่งต่ำกว่า 45 นาที ซึ่งข้าวเกรียบแป้งผสมที่มีปริมาณของแป้งสาคูร้อยละ 0-24 มีอัตราการพองตัวสูงสุดที่ระยะเวลานึ่งนาน 60 นาที โดยอัตราการพองตัวเฉลี่ยมีค่าเท่ากับร้อยละ 187.15-182.04 (ตารางที่ 12) แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลานึ่งนานขึ้นเป็น 75-120 นาที พบว่าอัตราการพองตัวของข้าวเกรียบแป้งผสมมีแนวโน้มลดลง โดยข้าวเกรียบในทุกสัดส่วนของแป้งผสมให้ผลในลักษณะเดียวกัน (ภาพที่ 20) อัตราการพองของข้าวเกรียบอาจมีผลสืบเนื่องจากระดับการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งจากผลการทดลองในตอนที่ 3.1.3 ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว (ตารางที่ 9)

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอัตราการพองตัวของข้าวเกรียบแป้งผสมหลังทอดร่วมกับระดับการเกิดเจลาติไนเซชันของข้าวเกรียบแป้งผสมก่อนทอดแสดงดังภาพที่ 21a-21h พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงที่มีความสอดคล้องกันกับผลการทดลองตอนที่ 3.1.3 ดังที่กล่าวมาแล้วในตารางที่ 9 กล่าวคือ เมื่อระดับของการเกิดเจลาติไนเซชันของข้าวเกรียบเพิ่มขึ้นเนื่องจากการให้ระยะเวลาการนึ่งนานขึ้น มีผลให้อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบแป้งผสมหลังมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ภายหลังเมื่อระยะเวลานึ่งนานขึ้นตั้งแต่ 60 นาที จนกระทั่งถึง 120 นาที ระดับของการเกิดเจลาติไนเซชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่พบว่าในช่วงเวลาดังกล่าวระดับการเกิดเจลาติไนเซชันไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) ขณะที่อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบมีแนวโน้มลดลง โดยข้าวเกรียบแป้งผสมทุกชุดการทดลองมีอัตราการพองตัวสูงสุดที่ระยะเวลานึ่งนาน 60 นาที ทั้งนี้การที่อัตราการพองตัวลดลงอาจเป็นเพราะการให้ระยะเวลานึ่งที่นาน มีผลให้โครงสร้างของแป้งถูกทำลายมากขึ้น ทำให้ข้าวเกรียบขยายตัวออกได้น้อยลง ดังนั้นระดับการเกิดเจลาติไนเซชันของข้าวเกรียบก่อนทอดจึงมีผลต่ออัตราการพองตัวของข้าวเกรียบหลังทอด

Kyaw และคณะ (1999) และ Kyaw และคณะ (2000a) รายงานว่าอัตราการพองตัวของข้าวเกรียบจะมีค่าสูงสุด ณ จุดที่เม็ดแป้งมีการพองตัวเต็มที่ โดยในระหว่างการนึ่งโดข้าวเกรียบมีผลให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัว ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการเกิดเจลาติไนเซชันโดยโมเลกุลของน้ำที่ถูกจับยึดไว้ภายในโครงสร้างของเม็ดแป้งที่พองตัว เมื่อทอดข้าวเกรียบ น้ำเกิดการระเหยเป็นไอแรงดันที่เกิดขึ้นสามารถดันให้แผ่นข้าวเกรียบมีการขยายตัวออก และอัตราการพองตัวของข้าวเกรียบปลาจะลดลง เมื่อให้ระยะเวลานึ่งนานกว่า 30 นาที ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากการให้ความร้อนเป็นระยะเวลานาน มีผลให้เม็ดแป้งที่พองตัวเต็มที่มีการแตกตัวออกมากขึ้น ซึ่งการแตกหักของเม็ดแป้งเกิดจากการแยกออกจากกันของโครงสร้างร่างแหของอะมิโลส ทั้งนี้เมื่อให้ระยะเวลานึ่งนานๆ เม็ดแป้งเกิดการเจลาติไนเซชันอย่างต่อเนื่อง ทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งถูกทำลายมากขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างร่างแหมีความอ่อนและความสามารถในการจับกับโมเลกุลของน้ำลดน้อยลง ทำให้โมเลกุลของน้ำถูกปลดปล่อยออกจากโครงสร้างของเม็ดแป้ง เมื่อนำไปทอดแรงดันที่เกิดขึ้นจากการระเหยเป็นไอของน้ำในโครงสร้างของเม็ดแป้งอ่อนลง จึงอาจจะส่งผลให้ข้าวเกรียบมีอัตราการพองตัวน้อยลง ซึ่งการนึ่งก้อนโดของข้าวเกรียบในระยะเวลาที่สามารถทำให้เม็ดแป้งเกิดการเจลาติไนเซชันได้อย่างสมบูรณ์ และเม็ดแป้งพองตัวเต็มที่โดยที่ยังไม่แตกตัวออก จะมีผลให้อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบมีค่าสูง ดังนั้นในผลการทดลองนี้จึงอาจเป็นไปได้ว่าที่ระยะเวลานึ่งนาน 60 นาที เม็ดแป้งสามารถจับกับโมเลกุลของน้ำได้มากกว่าชุดการทดลองที่มีระยะเวลานึ่งน้อยกว่า แต่ที่ระยะเวลานึ่งนาน 75 นาทีขึ้นไป อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบลดลง อาจเนื่องจากที่เม็ดแป้งเกิดการแตกตัวมากขึ้น หากเม็ดแป้งจำนวนหนึ่งเกิดแตกตัวไม่สามารถอุ้มน้ำไว้ได้และโมเลกุลเกิดการแตกหักมากขึ้น (โดยพบว่าเมื่อระยะเวลานึ่งเพิ่มขึ้นดัชนีการดูดซับน้ำซึ่งบ่งบอกถึงการแตกหักของโมเลกุล มีค่าเพิ่มมากขึ้น) ทำให้เจลข้าวเกรียบไม่แข็งแรง ดังนั้นเมื่อได้รับความร้อน เกิดแรงดันไอน้ำ ดันเจลข้าวเกรียบได้โดยง่าย มีผลให้ผนังเจลบางไม่มีความแข็งแรงที่จะอุ้มอากาศไว้ได้ ทำให้เกิดการยุบตัวของฟองอากาศบางส่วน ทำให้อัตราการพองตัวลดลง

นอกจากนี้ผลจากการทดลองพบว่าที่ระยะเวลานึ่งนานขึ้นและปริมาณแป้งสาคูเพิ่มขึ้น อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบแป้งผสมหลังทอดมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้แป้งสาคูมีปริมาณอะมิโลสสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง ปริมาณอะมิโลสอาจมีผลต่ออัตราการพองตัวของข้าวเกรียบ ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าความหนืดสุดท้ายภายหลังการลดลงอุณหภูมิลง พบว่าความหนืดของเจลแป้งสาคูมีค่าสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง ดังนั้นภายหลังวางทิ้งโดข้าวเกรียบไว้ให้เย็นลง ปริมาณอะมิโลสที่สูงในแป้งสาคูอาจมีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันสูงกว่าแป้งมันสำปะหลังที่มีโมเลกุลอะมิโลสต่ำกว่า โดยโมเลกุลอะมิโลสมีการจัดเรียงตัวกันใหม่ เกิดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงมากขึ้น จึงอาจส่งผลให้เจลสุกจากแป้งสาคูมีลักษณะแข็งกว่าเจลสุกจากแป้งมันสำปะหลัง ดังนั้นเจลที่แข็งแรงมากขึ้น

อาจจะมีผลให้ยากที่จะถูกดันให้ขยายตัวออกได้ง่าย ซึ่งเมื่อนำไปทอดมีผลให้การขยายตัวของแผ่นข้าวเกรียบเนื่องจากแรงดันไอเกิดขึ้นน้อย อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบแป้งผสมจึงมีแนวโน้มลดลง ดังนั้นการให้ระยะเวลานึ่งนานๆ เมื่อปริมาณแป้งสาคูเพิ่มขึ้นก็ทำให้ปริมาณของอะมิโลสในข้าวเกรียบแป้งผสมเกิดการแตกหักและละลายออกมามากขึ้น จึงอาจส่งผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของอะมิโลส และอาจทำให้อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบหลังทอดมีแนวโน้มลดลง



ภาพที่ 20 อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบหลังทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

Expansion ratio of fried cracker produced from the mixture between cassava and sago starches with different levels of sago starch added (0, 6, 12, 18 and 24%)

Note: 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.

ตารางที่ 12 อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบหลังทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

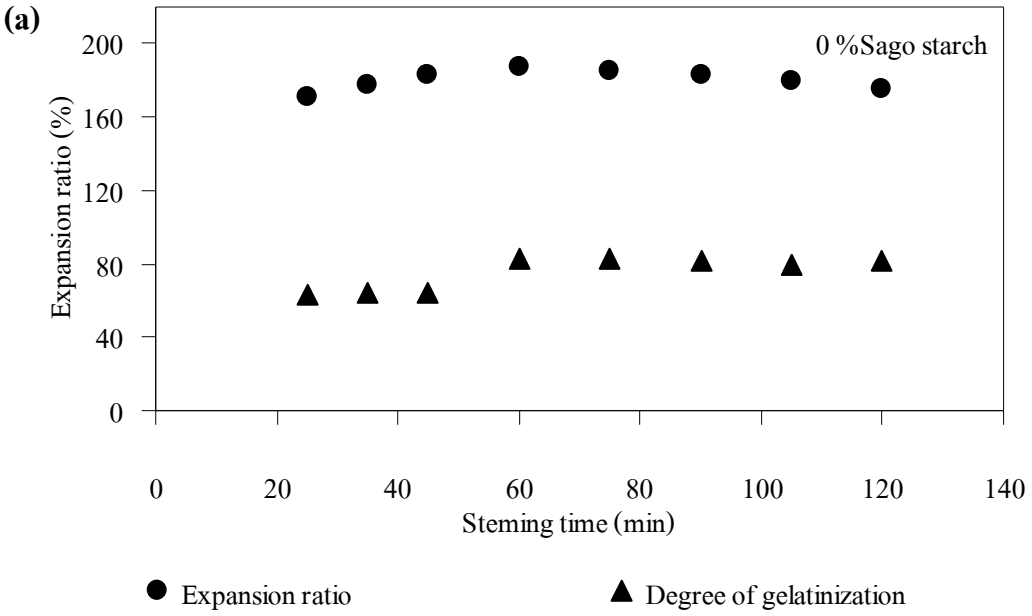
Expansion ratio of fried cracker produced from the mixture between cassava and sago starches with different levels of sago starch added (0, 6, 12, 18 and 24%)

Sago starch (%)	Expansion ratio (%)							
	Steaming time (min)							
	25	35	45	60	75	90	105	120
0% (Cassava starch)	171.09±0.73^{g}	177.14±0.67^{e}	182.69±0.93^{c}	187.15±0.67^{a}	184.61±0.47^{b}	182.99±0.82^{c}	180.05±0.79^{d}	175.80±0.91^{f}
6% Sago starch	169.53±0.58^{g}	176.61±0.96^{e}	180.66±0.75^{c}	186.12±0.96^{a}	184.56±0.62^{b}	179.70±0.71^{cd}	178.82±0.71^{d}	173.66±0.73^{f}
12% Sago starch	168.55±0.81^{g}	174.712±0.87^{e}	178.85±0.94^{d}	184.16±0.94^{a}	182.07±0.95^{b}	180.57±0.92^{c}	178.27±058^{d}	169.67±0.80^{f}
18% Sago starch	166.64±0.63^{g}	171.99±0.93^{e}	177.54±0.75^{d}	183.66±0.89^{a}	181.15±0.37^{b}	179.97±0.30^{c}	177.47±0.91^{d}	169.66±0.74^{f}
24% Sago starch	162.49±0.72^{g}	170.44±0.87^{e}	178.04±0.66^{c}	182.04±0.74^{a}	180.69±0.30^{b}	178.75±0.18^{c}	173.08±0.68^{d}	166.92±0.78^{f}

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 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.



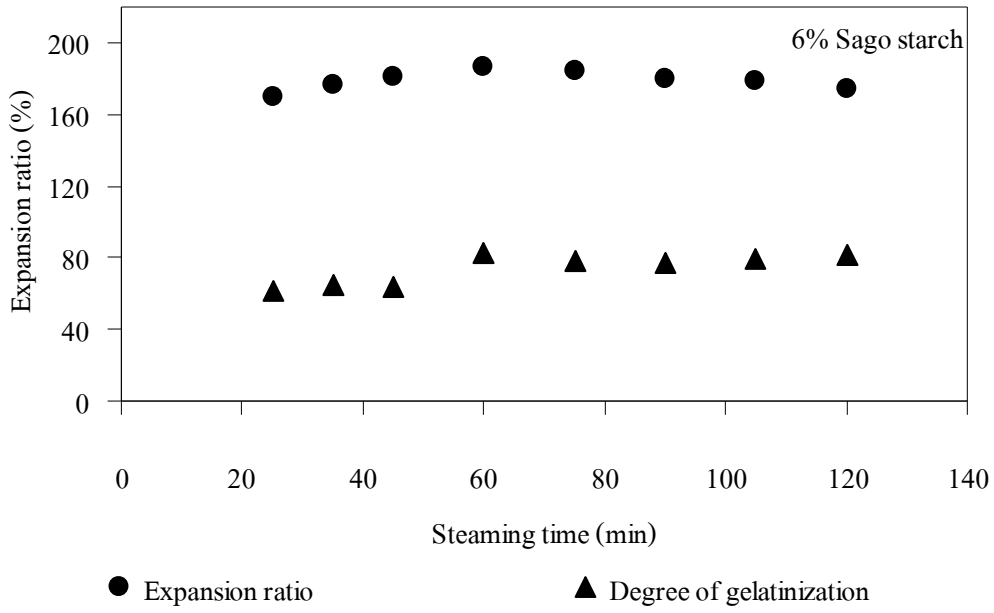
ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการเกิดเจลาติไนเซชันของข้าวเกรียบที่ยังไม่ผ่านการทอดและอัตราการพองตัวของข้าวเกรียบหลังทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0 (a), 6 (b), 12 (c), 18 (d) และ 24 (e)

Relationships between degree of gelatinization of raw cracker and expansion ratio of fried cracker produced from the mixture between cassava and sago starches with different levels of sago starch added (0 (a), 6 (b), 12 (c), 18 (d) and 24% (e))

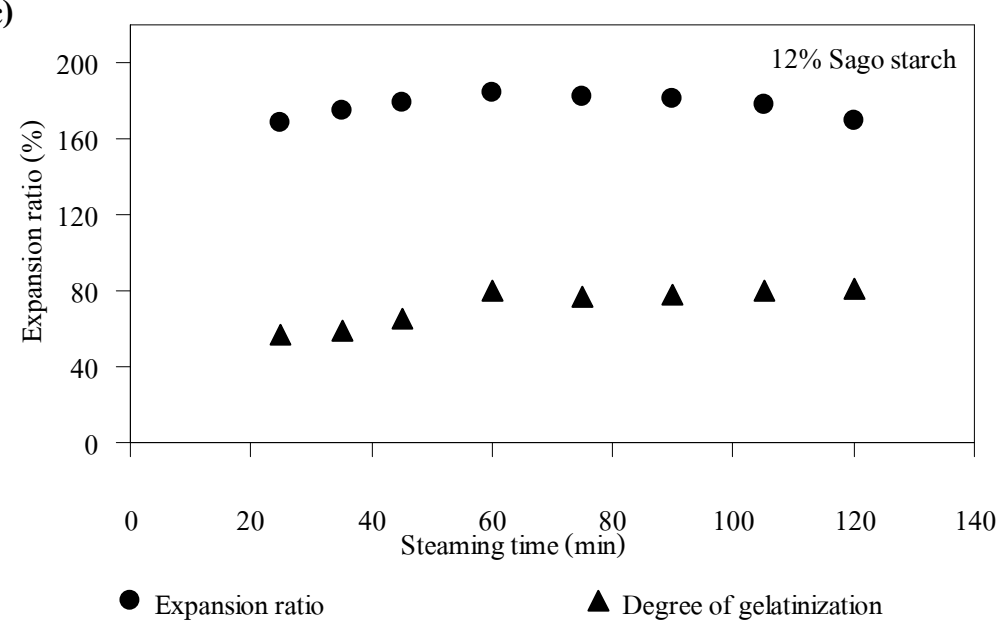
Note: All raw crackers were prepared by steaming the starch mixtures at 100°C for 25-120 min, followed by drying at 55-60°C for 3-4 h

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.

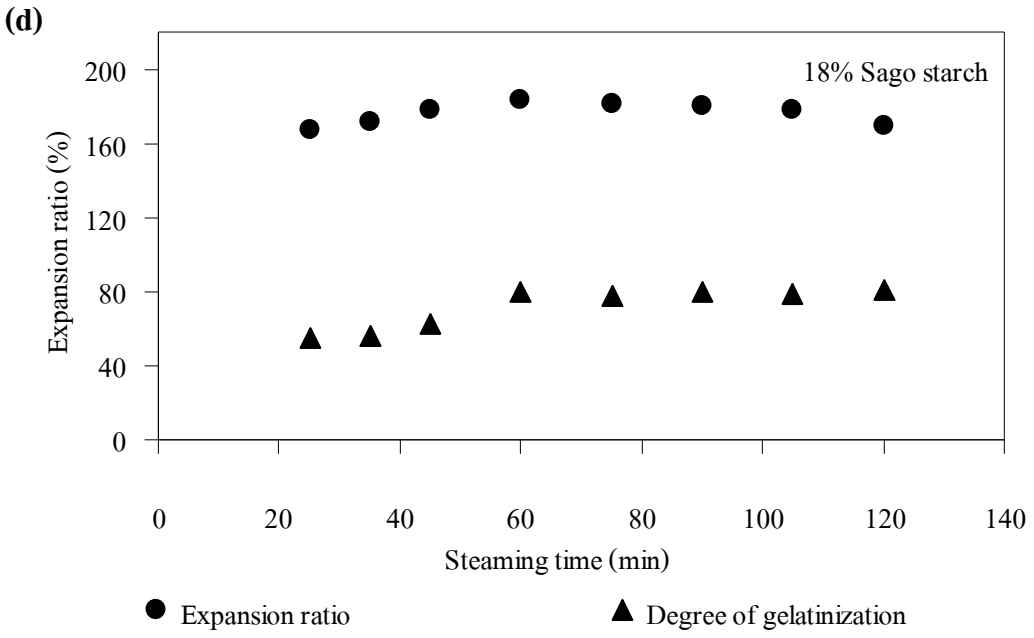
(b)

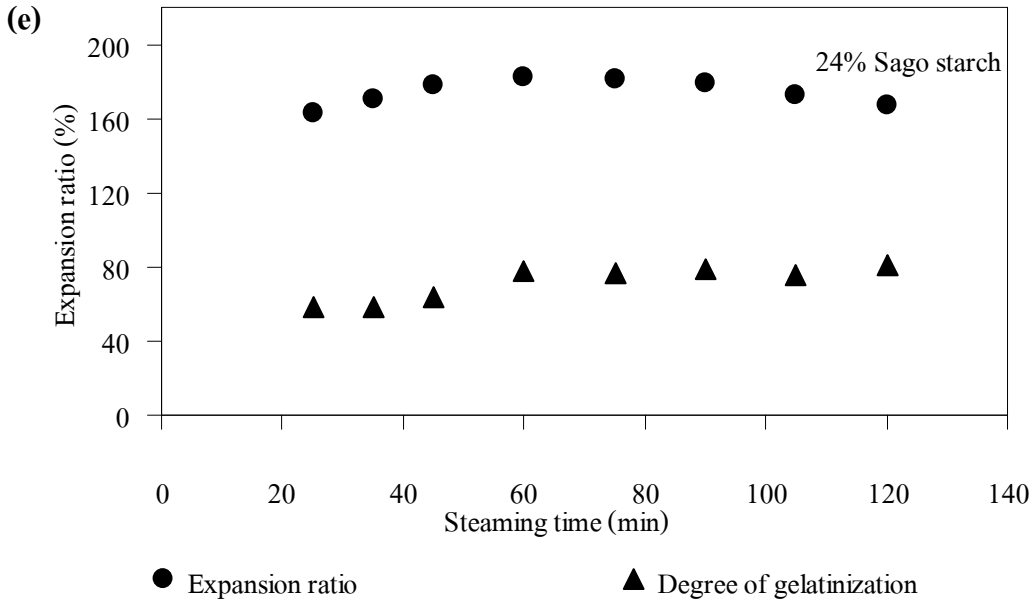

6% Sago starch
Expansion ratio (%)
0
40
80
120
160
200
0
20
40
60
80
100
120
140
Steaming time (min)
Expansion ratio
Degree of gelatinization

(c)


12% Sago starch
Expansion ratio (%)
0
40
80
120
160
200
0
20
40
60
80
100
120
140
Steaming time (min)
Expansion ratio
Degree of gelatinization

ภาพที่ 21 (ต่อ)


(d)
18% Sago starch
Expansion ratio (%)
200
160
120
80
40
0
0
20
40
60
80
100
120
140
Steaming time (min)
Expansion ratio
Degree of gelatinization


(e)
24% Sago starch
Expansion ratio (%)
200
160
120
80
40
0
0
20
40
60
80
100
120
140
Steaming time (min)
Expansion ratio
Degree of gelatinization

ภาพที่ 21 (ต่อ)

3.2.2 ลักษณะและจำนวนโพรงอากาศของข้าวเกรียบแป้งผสมหลังทอด

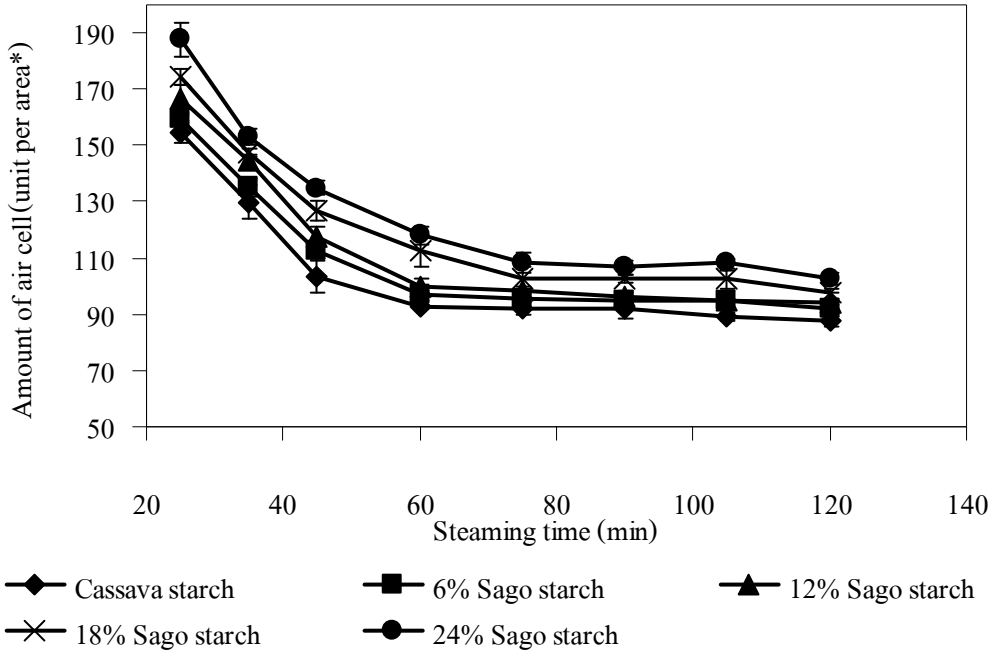
จากการตรวจสอบลักษณะโพรงอากาศของข้าวเกรียบทอด โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอที่กำลังขยาย 125 เท่า บันทึกภาพจากกล้องด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปได้ดังภาพที่ 23a-23h ลักษณะโพรงอากาศของข้าวเกรียบแป้งผสมที่ได้ภายหลังการทอดมีลักษณะโปร่งใส ซึ่งลักษณะปรากฏดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อแผ่นข้าวเกรียบแห้งได้รับความร้อนสูงในระหว่างการทอดทำให้โมเลกุลของน้ำที่แทรกตัวในโครงสร้างของแผ่นข้าวเกรียบระเหยกลายเป็นไอขึ้นอย่างรวดเร็ว แรงดันไอดังกล่าวจะดันให้เนื้อแป้งสุกของข้าวเกรียบขยายตัวเกิดเป็นช่องว่างของโพรงอากาศขึ้น (Colonna *et al.,* 1989) ซึ่งลักษณะโพรงอากาศของข้าวเกรียบแป้งผสมในทุกชุดการทดลองมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ นับจำนวนโพรงอากาศโดยปรับขยายภาพให้ใหญ่ขึ้นและมีขนาดพื้นที่เท่ากันทุกภาพ คือ 8x10 ตารางเซนติเมตร จากการนับจำนวนโพรงอากาศบนพื้นที่ปรากฏได้ผลดังแสดงในตารางที่ 13 และภาพที่ 22 โดยพบว่าปริมาณแป้งสาคูและระยะเวลาการนึ่งมีผลต่อจำนวนโพรงอากาศต่อพื้นที่ปรากฏของข้าวเกรียบทุกชุดการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) อีกทั้งมีอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยดังกล่าวอีกด้วย (ตารางภาคผนวกที่ 10)

ปริมาณแป้งสาคูมีผลต่อจำนวนโพรงอากาศต่อพื้นที่ปรากฏกล่าวคือเมื่อปริมาณแป้งสาคูเพิ่มขึ้น จำนวนโพรงอากาศเพิ่มขึ้น (แต่มีขนาดของโพรงอากาศเล็กลง) ซึ่งผลการทดลองเป็นไปในทำนองเดียวกันในทุกระยะเวลานึ่ง ทั้งนี้อาจเนื่องจากเหตุผลเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงอัตราการพองตัว ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น นั่นคือปริมาณแป้งสาคูในแป้งผสมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เจลของข้าวเกรียบแข็งแรงขึ้น แรงดันไอสามารถดันให้เจลการขยายตัวได้น้อยทำให้และเกิดโพรงอากาศเพียงขนาดเล็กจำนวนมาก เมื่อเปรียบเทียบจำนวนโพรงอากาศต่อพื้นที่ที่เท่ากันจำนวนโพรงอากาศที่มีขนาดเล็กย่อมมากกว่านั่นเอง

ระยะเวลานึ่งมีผลต่อจำนวนโพรงอากาศต่อพื้นที่ปรากฏอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กล่าวคือเมื่อระยะเวลานึ่งเพิ่มขึ้นมีผลให้จำนวนโพรงอากาศลดลง (แต่มีขนาดใหญ่ขึ้น) และผลการทดลองเป็นไปในทำนองเดียวกันในข้าวเกรียบแป้งผสมทุกสัดส่วน อย่างไรก็ตามพบว่าชุดการทดลองที่ระยะเวลานึ่งนาน 60-120 นาที มีจำนวนของโพรงอากาศต่อพื้นที่ปรากฏไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงอัตราการพองตัวของข้าวเกรียบหลังทอด ซึ่งอาจเป็นผลต่อเนื่องจากระดับการเกิดเจลาติไนเซชันของเจลข้าวเกรียบที่ผ่านการนึ่ง เช่นเดียวกัน ดังที่ได้กล่าวแล้วในข้อ 3.1.3 นอกจากนี้จะเห็นว่าชุดการทดลองที่ระยะเวลานึ่งนาน 60 นาที เป็นชุดการทดลองที่ให้จำนวนโพรงอากาศน้อยกว่าและแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จากชุดการทดลองที่ระยะเวลานึ่งนาน 45 นาที แต่ไม่มีความแตกต่างจากชุดการทดลองที่มีระยะเวลานึ่งที่นานกว่า คือ 75-120 นาที ซึ่งจำนวนโพรงอากาศมีแนวโน้มลดลง การนึ่ง

เป็นระยะเวลานานมากกว่า 60 นาที มีผลให้โครงสร้างของแป้งถูกทำลายมากขึ้น ความแข็งแรงของเจลข้าวเกรียบลดลงเมื่อถูกดันด้วยแรงดันไอน้ำเกิดโพรงอากาศที่มีผนังไม่แข็งแรงและเกิดการฉีกขาดได้ง่ายมีผลให้โพรงอากาศเกิดการรวมตัวกันและขยายขนาดใหญ่ขึ้น

จากผลการทดลองจะเห็นว่าลักษณะและจำนวนโพรงอากาศในข้าวเกรียบสอดคล้องกับอัตราการพองตัวของข้าวเกรียบดังที่ได้อธิบายในข้อ 3.2.1 กล่าวคือเมื่อขนาดของโพรงอากาศขยายใหญ่ (มีจำนวนลดลง) จะส่งผลให้อัตราการพองของข้าวเกรียบเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจมีผลสืบเนื่องจากระดับการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งที่มีอิทธิพลต่ออัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูปเมื่อทอดในน้ำมันร้อน โดยการเกิดเจลาติไนเซชันที่ไม่สมบูรณ์ของแป้งมีผลให้อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบลดลง (Mohamed *et al.,* 1989)



ภาพที่ 22 จำนวนโพรงอากาศของข้าวเกรียบหลังทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

Amount of air cell of fried cracker produced from the mixture between cassava and sago starches with different levels of sago starch added (0, 6, 12, 18 and 24%)

Note: 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.

*Area under stereo microscope is 8x10 m^2

ตารางที่ 13 จำนวนโพรงอากาศของข้าวเกรียบหลังทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

Amounts of air cell of fried cracker produced from the mixture between cassava and sago starches with different levels of sago starch added (0, 6, 12, 18 and 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^{a}	129.67±6.03^{b}	103.33±5.51^{c}	92.33±0.58^{d}	91.67±2.08^{d}	92.00±3.61^{d}	89.33±1.53^{d}	87.30±2.08^{d}
6% Sago starch	159.33±1.53^{a}	135.00±3.00^{b}	112.33±2.52^{c}	96.67±0.58^{d}	95.67±0.58^{de}	95.00±3.00^{de}	94.67±3.514^{de}	91.67±1.53^{e}
12% Sago starch	166.67±4.93^{a}	144.33±2.31^{b}	117.33±3.51^{c}	100.00±2.65^{d}	98.33±1.53^{de}	96.33±1.53^{de}	94.67±0.58^{de}	94.33±3.51^{e}
18% Sago starch	174.33±3.06^{a}	147.33±1.15^{b}	126.67±3.79^{c}	112.67±5.51^{d}	102.33±4.73^{e}	102.67±1.53^{e}	102.33±3.06^{e}	97.33±1.53^{e}
24% Sago starch	187.67±6.03^{a}	153.00±3.00^{b}	134.67±2.52^{c}	118.00±3.00^{d}	108.00±3.61^{e}	106.67±2.52^{e}	108.00±2.00^{e}	102.67±2.31^{e}

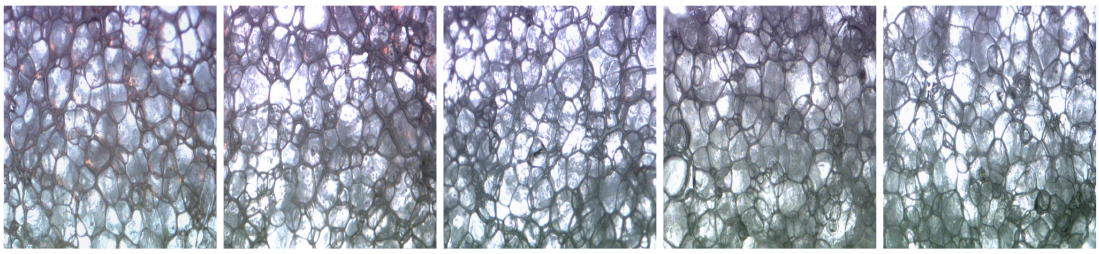
Note: Each value is the mean of triplicate ± SD.

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.

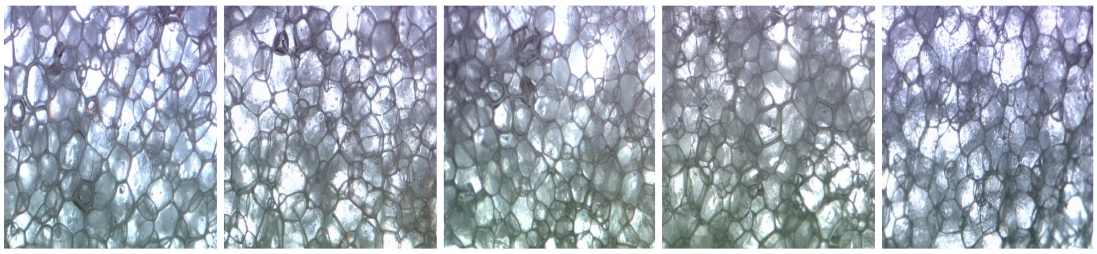
*Area under stereo microscope is 8x10 m^2

(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



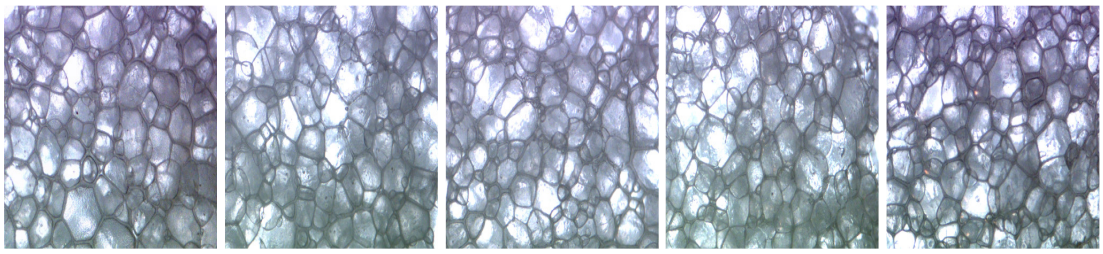
Cassava starch 6% Sago starch 12% Sago starch 18% Sago starch 24% Sago starch

ภาพที่ 23 ลักษณะโพรงอากาศของข้าวเกรียบหลังทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24 ภายหลังการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°ซ ระยะเวลานาน 25 นาที (a), 35 นาที (b), 45 นาที (c), 60 นาที (d), 75 นาที (e), 90 นาที (f), 105 นาที (g) และ 120 นาที ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอที่กำลังขยาย 125 เท่า ภายใต้พื้นที่ 8x10 ตารางเซนติเมตร

Air cell characteristic of fried cracker produced from the mixture between cassava and sago starches with different levels of sago starch added (0, 6, 12, 18 and 24%) steamed at 100°C for 25 min (a), 35 min (b), 45 min (c), 60 min (d), 75 min (e), 90 min (f), 105 min (g), 120 min (h) under stereo microscope (x125) within the area of 8x10 m^2

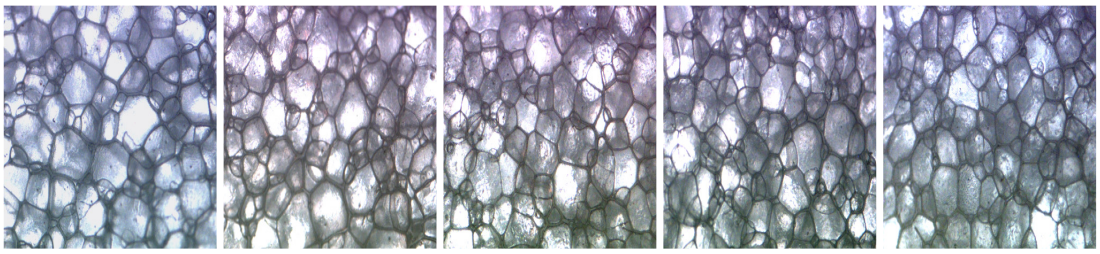
Note: All fried crackers were prepared by steaming the starch mixtures at 100°C for 25-120 min, followed by drying at 55-60°C for 3-4 h and frying at 190-200°C for 25 sec.

(c) Steaming time for 45 min



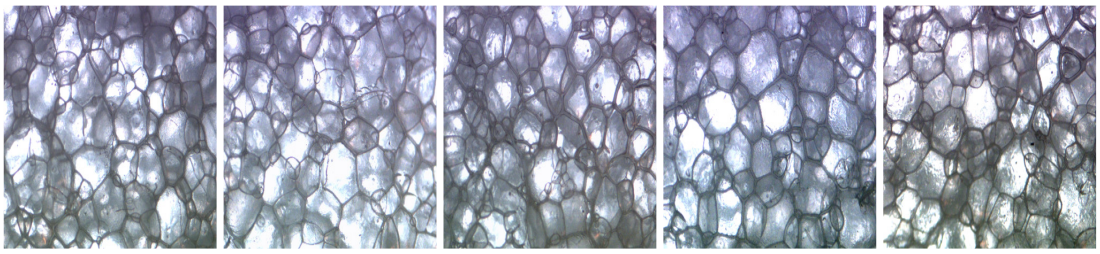
Cassava starch 6% Sago starch 12% Sago starch 18% Sago starch 24% Sago starch

(d) Steaming time for 60 min



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

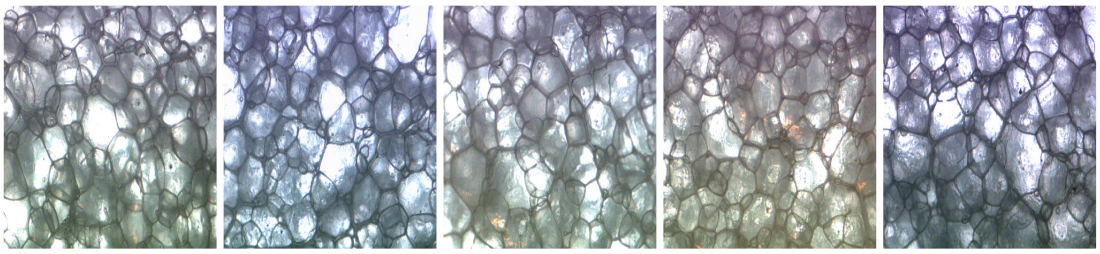
(e) Steaming time for 75 min



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

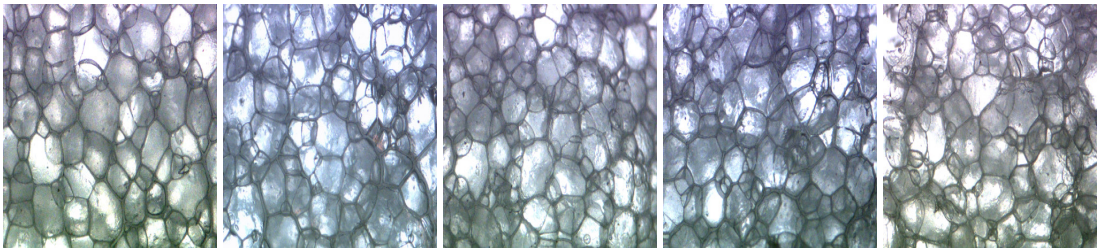
ภาพที่ 23 (ต่อ)

(f) Steaming time for 90 min



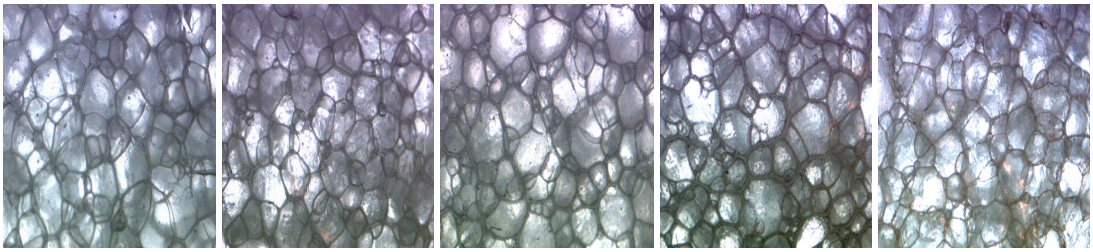
Cassava starch 6% Sago starch 12% Sago starch 18% Sago starch 24% Sago starch

(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

ภาพที่ 23 (ต่อ)

3.2.3 ค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบแป้งผสมหลังทอด

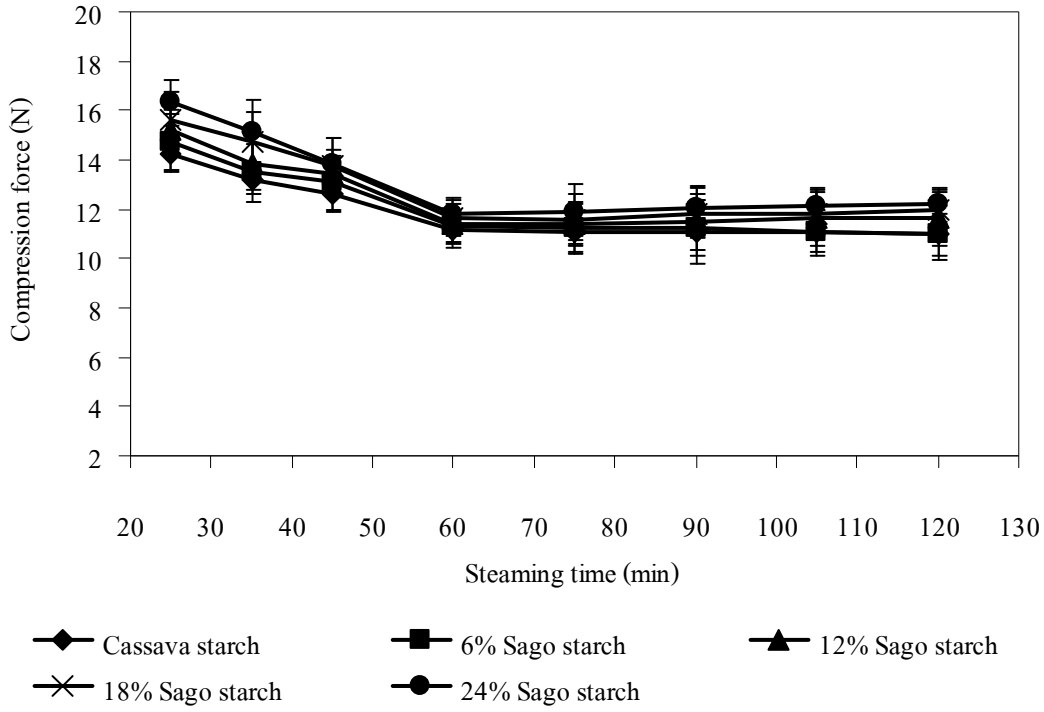
จากผลการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Texture analyzer ของข้าวเกรียบแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูภายหลังการทอดที่มีปริมาณของแป้งสาคูและระยะเวลานึ่งแตกต่างกัน โดยวัดค่าแรงกด (Compression force) พบว่าปริมาณของแป้งสาคูและระยะเวลานึ่งมีผลต่อค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ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

เมื่อปริมาณแป้งสาคูในข้าวเกรียบแป้งผสมเพิ่มขึ้น (ในทุกชุดการทดลองที่ระยะเวลานึ่งเท่ากัน ทุกระยะเวลานึ่ง) มีผลให้ค่าแรงกดของข้าวเกรียบแป้งผสมมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยพบว่าข้าวเกรียบจากแป้งมันสำปะหลัง (มีแป้งสาคูร้อยละ 0) มีค่าแรงกดน้อยที่สุด ขณะที่ข้าวเกรียบแป้งผสมที่ปริมาณแป้งสาคูร้อยละ 24 มีค่าแรงกดสูงที่สุด (ภาพที่ 24) ซึ่งแสดงถึงว่าข้าวเกรียบจากแป้งมันสำปะหลังมีความกรอบมากที่สุด ทำให้ใช้แรงกดน้อยในการทำให้เกิดการแตกหัก

ระยะเวลาการนึ่งของข้าวเกรียบมีผลต่อค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางภาคผนวกที่ 11) โดยในชุดการทดลองที่มีแป้งผสมสัดส่วนเดียวกันที่ระยะเวลานึ่งนาน 25-60 นาที แรงกดมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิต ($p \leq 0.05$) ในทุกชุดการทดลอง และพบว่าในช่วงระยะเวลานึ่งนาน 60-120 นาที ค่าแรงกดเฉลี่ยของข้าวเกรียบแป้งผสมหลังทอดไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) (ตารางที่ 14) ดังนั้นระยะเวลานึ่งนาน 60 นาที จึงเป็นระยะเวลาที่น้อยที่สุดที่ให้ข้าวเกรียบที่มีค่าแรงกดไม่แตกต่างจากชุดการทดลองที่มีระยะเวลานึ่งสูงกว่า ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับอัตราการขยายตัวและลักษณะของโพรงอากาศดังได้กล่าวแล้วข้างต้น โพรงอากาศขนาดเล็กจำนวนมากมีผนังที่ห่อหุ้มหนาและมีจำนวนมากเช่นกัน ต้องใช้แรงสูงในการกดทะลุ ซึ่งตรงกันข้ามกับโพรงอากาศขนาดใหญ่ อัตราการพองตัวข้าวเกรียบมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับค่าแรงกด ข้าวเกรียบที่มีอัตราการพองตัวสูง มีผลให้โมเลกุลของแป้งที่ล้อมรอบช่องโพรงอากาศมีความหนาแน่นน้อย ข้าวเกรียบจึงแตกหักได้ง่าย (Mohamed *et al.*, 1988) ค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสที่วัดได้มีค่าน้อย ทำให้ข้าวเกรียบมีค่าความกรอบเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าผลการทดลองที่ได้นี้ อาจจะเป็นผลสืบเนื่องมาจากระดับการเกิดเจลาติไนเซชันและการเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวเกรียบ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณอะมิโลสในแป้งผสม เนื่องจากแป้งสาคูมีปริมาณอะมิโลสสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง มีผลให้เกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลในเจลของโดข้าวเกรียบหลังการทำให้เย็นลง มีผลให้โครงสร้างเจลของโดข้าวเกรียบมีความแข็งแรงมากขึ้นและเกิดการขยายตัวได้ยากในระหว่างการทอด อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบแป้งผสมจึงลดลง เนื่องจากเกิดโพรงอากาศขนาดเล็กและมี

จำนวนเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของแป้งสาคูเพิ่มขึ้น ดังนั้นโพรงอากาศขนาดเล็กที่เป็นผลเนื่องจากการเพิ่มปริมาณแป้งสาคูในแป้งมันสำปะหลัง อาจส่งผลให้เกิดความสม่ำเสมอของโพรงอากาศในแผ่นข้าวเกรียบแป้งผสมภายหลังการทอด ซึ่งการจัดเรียงตัวอย่างสม่ำเสมอของโพรงอากาศจะมีผลให้เสริมความแข็งแรงของโพรงอากาศเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบแป้งผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของแป้งสาคูเพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีลักษณะกรอบแข็ง ขณะที่ข้าวเกรียบแป้งมันสำปะหลังมีอัตราการพองตัวสูงและลักษณะโพรงอากาศมีขนาดใหญ่ ดังนั้นแผ่นข้าวเกรียบจากแป้งมันสำปะหลังจะมีพื้นที่ที่เป็นช่องว่างมากทำให้ข้าวเกรียบมีความหนาแน่นต่ำและโพรงอากาศไม่แข็งแรง ข้าวเกรียบจากแป้งมันสำปะหลังจึงแตกหักได้ง่าย ผลิตภัณฑ์จึงมีลักษณะกรอบแต่เปราะ ส่งผลให้ค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบจากแป้งมันสำปะหลังมีค่าน้อยกว่า

จากการศึกษาของเทวี ทองแดง (2545) รายงานว่าปริมาณอะมิโลสมีผลต่อค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์ข้าวพอง โดยค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสผลิตภัณฑ์ข้าวพองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอะมิโลสสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอะมิโลสมีผลต่อการพองตัวของผลิตภัณฑ์ข้าวพอง ซึ่งข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ ปริมาตรของการพองตัวสูง ทำให้มีช่องว่างภายในเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการแตกหักได้ง่าย เมื่อมีแรงมากระทำ และจากรายงานของ รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต (2543) กล่าวว่าขนมขบเคี้ยวจากข้าวเหนียว กข 6 มีความพองตัวมากกว่าขนมขบเคี้ยวจากข้าวเจ้า เนื่องจากมีปริมาณของอะมิโลสต่ำมากทำให้การเกิดเจลาติไนเซชันเกิดขึ้นได้เร็วและสมบูรณ์มากกว่า รวมทั้งมีผลให้อัตราการรีโทรเกรเดชันต่ำกว่า จึงทำให้ขนมขบเคี้ยวจากข้าวเหนียวมีค่าความแข็งที่น้อยกว่าขนมขบเคี้ยวจากข้าวเจ้า เช่นเดียวกันกับการศึกษาของ Kyaw และคณะ (2001a) พบว่าที่อุณหภูมิการนึ่ง 100°ซ และระยะเวลานึ่งเท่ากัน ข้าวเกรียบปลาที่ผลิตจากแป้งข้าวสาลีมีค่าแรงกด (compressive strength) มากกว่าข้าวเกรียบปลาจากแป้งมันสำปะหลัง ทั้งนี้เนื่องจากแป้งข้าวสาลีมีปริมาณอะมิโลสอยู่ร้อยละ 25 ซึ่งมากกว่าแป้งมันสำปะหลังที่มีอะมิโลสอยู่ร้อยละ 17 ส่งผลให้แป้งสาลีที่ผ่านการทำให้สุก จะมีเจลลักษณะแข็งกว่าแป้งมันสำปะหลัง



ภาพที่ 24 ค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบหลังทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

Compression force of fried cracker produced from the mixture between cassava and sago starches with different levels of sago starch added (0, 6, 12, 18 and 24%)

Note: 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.

ตารางที่ 14 ค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบหลังทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0, 6, 12, 18 และ 24

Compression force of fried cracker produced from the mixture between cassava and sago starches with different levels of sago starch added (0, 6, 12, 18 and 24%)

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

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

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

Note: 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. ผลการเก็บรักษาต่อคุณภาพของข้าวเกรียบแป้งผสมหลังการทอด

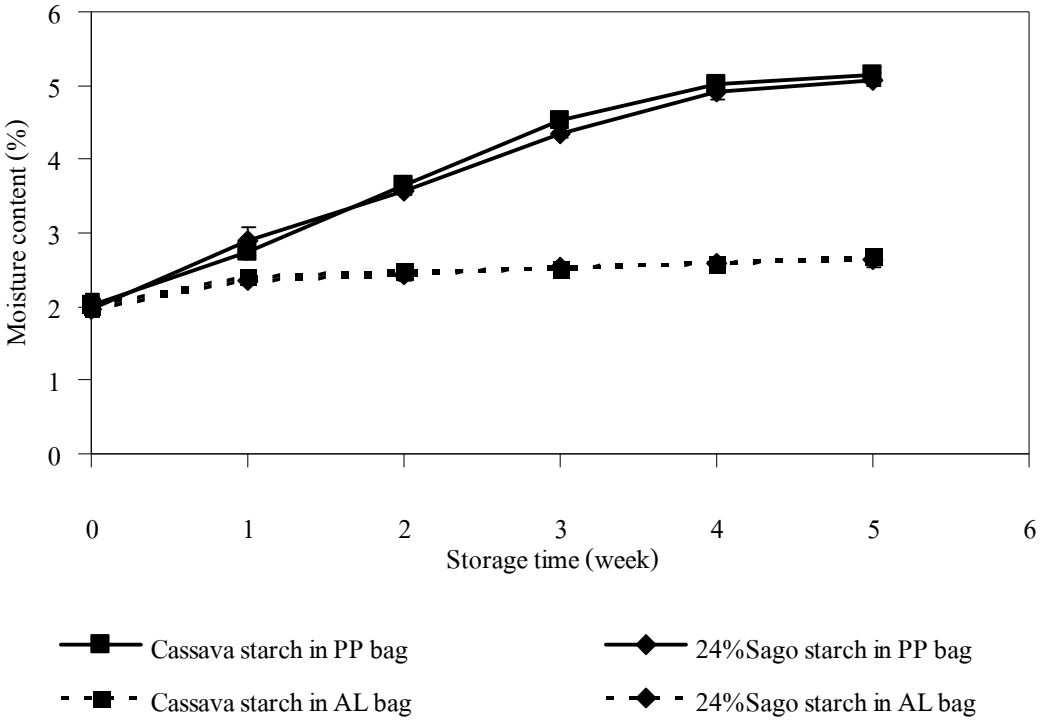
จากการทดลองในข้อ 3 ได้คัดเลือกข้าวเกรียบแป้งผสมที่มีปริมาณแป้งสาคูร้อยละ 0 และ 24 และระยะเวลานึ่งนาน 60 นาที เพื่อเป็นตัวแทนตัวอย่างในการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของข้าวเกรียบแป้งผสมภายหลังทอดในระหว่างการเก็บรักษา โดยพิจารณาจากระดับของการเกิดเจลาติไนเซชันของข้าวเกรียบแป้งผสมในการทดลองข้อ 3.1 อัตราการพองตัวและลักษณะเนื้อสัมผัสในการทดลองข้อ 3.2 โดยที่พบว่าข้าวเกรียบแป้งผสมชุดการทดลองที่ระยะเวลานึ่ง 60 นาที ให้ผลแตกต่างจากระยะเวลานึ่ง 45 นาที อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่ไม่แตกต่างจากชุดการทดลองที่ใช้ระยะเวลานึ่งสูงกว่า ดังนั้นจึงเป็นระยะเวลานึ่งที่สั้นที่สุดที่ทำให้ผลไม่ต่างจากระยะเวลานึ่งที่นานกว่า (ดังแสดงในตารางที่ 9) และเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของแป้งสาคู ดังนั้นจึงเลือกชุดการทดลองที่มีปริมาณแป้งสาคูร้อยละ 24 (ชุดการทดลองที่ใช้แป้งสาคูในปริมาณสูงสุด) เปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่มีแป้งสาคู โดยใช้บรรจุภัณฑ์ 2 ชนิด คือถุงโพลีโพรพิลีน (PP) และถุงอะลูมิเนียมลามิเนต (AL) แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลานาน 5 สัปดาห์ และสุ่มตัวอย่างมาตรวจวิเคราะห์คุณภาพของข้าวเกรียบแป้งผสม ได้แก่ ค่าความชื้น ค่าแรงกดของเนื้อสัมผัส และค่า TBARS ในแต่ละสัปดาห์ ได้ผลดังนี้

4.1 ปริมาณความชื้น

ผลการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของข้าวเกรียบจากแป้งมันสำปะหลังและข้าวเกรียบแป้งผสมที่มีปริมาณแป้งสาคูร้อยละ 24 ในระหว่างการเก็บรักษานาน 5 สัปดาห์ (ภาพที่ 25) พบว่าชนิดของบรรจุภัณฑ์และระยะเวลาการเก็บรักษามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของข้าวเกรียบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางภาคผนวกที่ 12) แต่ชนิดของแป้งไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น ($p > 0.05$) (ตารางภาคผนวกที่ 12) อีกทั้งไม่มีอิทธิพลร่วมกันระหว่างทั้ง 3 ปัจจัยนี้ กล่าวคือ ปริมาณความชื้นของข้าวเกรียบในทุกชุดการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น โดยอัตราการเพิ่มค่าความชื้นของข้าวเกรียบทั้ง 2 ชนิด ที่บรรจุในถุงโพลีโพรพิลีนสูงกว่าข้าวเกรียบที่บรรจุในถุงอะลูมิเนียมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางภาคผนวกที่ 12) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะถุงโพลีโพรพิลีนมีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (0.7 กรัม/ตรม./วัน) สูงกว่าถุงอะลูมิเนียมลามิเนต (0.1 กรัม/ตรม./วัน) ส่งผลให้ค่าความชื้นของข้าวเกรียบที่บรรจุในถุงโพลีโพรพิลีนมีค่าสูงกว่าข้าวเกรียบที่บรรจุในถุงอะลูมิเนียมภายหลังการเก็บรักษานาน 5 สัปดาห์

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

ผลจากการทดลองมีความสอดคล้องกับการศึกษาของณัฐนันทน์ ชุมแก้ว (2543) ซึ่งกล่าวว่าผลิตภัณฑ์ข้าวพองเสริมใยอาหารจะมีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับรายงานของ วิภาดา ชัยจะโปะ (2542) กล่าวว่าระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานขึ้นมีผลให้ผลิตภัณฑ์แครกเกอร์ปลาทูน่ามีความชื้นเพิ่มขึ้น และจากรายงานของรณิดา นิลวิเชียร (2541) ที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขบเคี้ยวจากปลาตาโตในระหว่างการเก็บรักษา พบว่าการเก็บผลิตภัณฑ์ในบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกันมีผลต่อปริมาณความชื้น โดยผลิตภัณฑ์ขบเคี้ยวที่บรรจุในถุงโพลีโพรพิลีนมีปริมาณความชื้นสูงกว่าในถุงโอเรียลเต็ดโพลิโพรพิลีนตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ทั้งนี้เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีความชื้นในระดับต่ำกว่าความชื้นในบรรยากาศ ทำให้มีโอกาสที่ดูดความชื้นจากรอบข้างได้ง่าย (Labuza, 1982) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าบรรจุภัณฑ์ในการบรรจุมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น ซึ่งการเก็บในบรรจุภัณฑ์ที่สามารถป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดีกว่า มีผลให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความชื้นในผลิตภัณฑ์นั้นมีค่าน้อยกว่า



ภาพที่ 25 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของข้าวเกรียบหลังทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0 และ 24 ภายหลังผ่านการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°ซ ระยะเวลานาน 60 นาที ในถุงโพลีโพรพิลีนและถุงอะลูมิเนียมลามิเนต ระหว่างการเก็บรักษา 5 สัปดาห์

Changes in moisture content of fried cracker produced from the mixture between cassava and sago starches with different levels of sago starch added (0 and 24%) steamed at 100°C for 60 min in polypropylene (PP) and aluminum laminate (AL) bags during storage time for 5 weeks

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

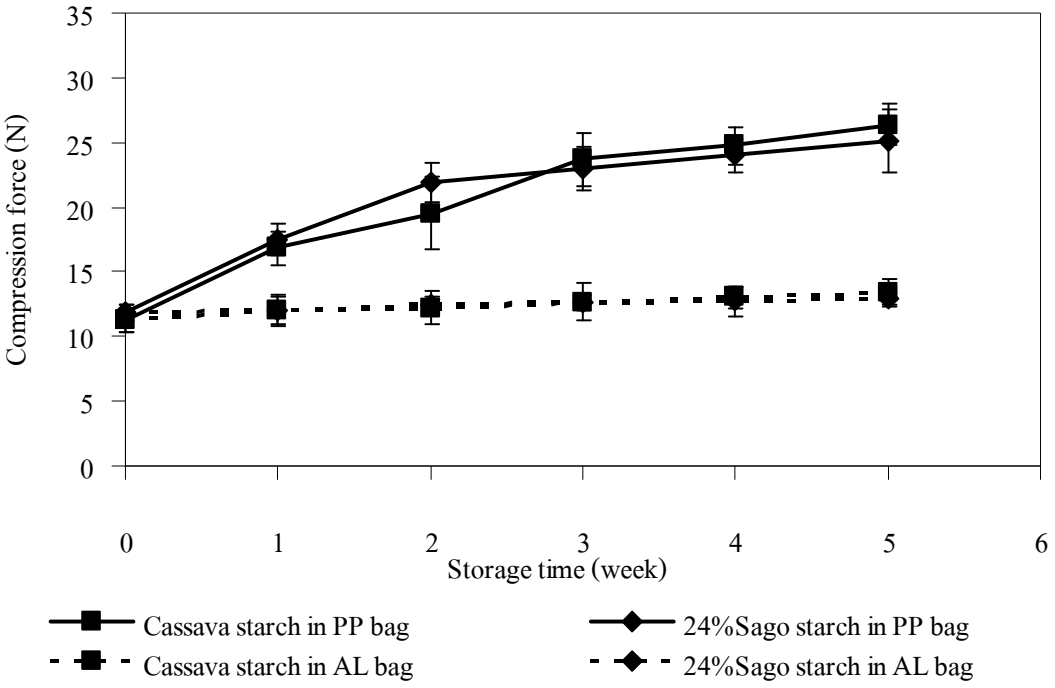
4.2 ค่าแรงกดของเนื้อสัมผัส

จากการวิเคราะห์ค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบโดยใช้เครื่อง Texture analyzer ในระหว่างการเก็บรักษา พบว่าชนิดของบรรจุภัณฑ์ และระยะเวลาการเก็บรักษามีผลต่อค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางภาคผนวกที่ 13) ขณะที่ชนิดของแป้งไม่มีผลต่อค่าแรงกดของเนื้อสัมผัส ($p > 0.05$) (ตารางภาคผนวกที่ 13) และไม่มีอิทธิพลร่วมกันระหว่างทั้ง 3 ปัจจัยนี้ ($p > 0.05$) แต่อย่างไรก็ตามพบว่าค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบในทุกชุดการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเก็บรักษาที่นานขึ้น (ภาพที่ 26)

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) พบว่าค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์อาหารเช้าจากธัญพืชจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อมีค่า a_w ระหว่าง 0-0.5 หรือปริมาณความชื้นร้อยละ 7 หลังจากนั้นความกรอบจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยความชื้นที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวมีความเหนียวเพิ่มขึ้น (Suwonsichon and Peleg, 1998) และจากการศึกษาของ Mazumder และคณะ (2006) กล่าวว่าความชื้นมีบทบาทสำคัญต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์และมีผลโดยตรงต่อลักษณะความกรอบ โดยความชื้นที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ค่าแรงกดมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำ ส่งผลให้ความกรอบมีค่าลดลง ดังนั้นการบรรจุข้าวเกรียบในถุงโพลิโพรพิลีน ซึ่งอัตราการซึมผ่านของไอน้ำมากกว่าถุงอะลูมิเนียมลามิเนต ค่าความกรอบของข้าวเกรียบจึงมีค่าลดลงมากกว่าในระหว่างระยะเวลาการเก็บรักษา

ขณะที่ชนิดของแป้งไม่มีผลต่อค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) (ตารางภาคผนวกที่ 13) กล่าวคือ ข้าวเกรียบจากแป้งมันสำปะหลังและข้าวเกรียบแป้งผสมที่ปริมาณแป้งสาคูร้อยละ 24 ในบรรจุภัณฑ์ชนิดเดียวกันและระยะเวลานึ่งที่เท่ากันมีค่าแรงกดไม่แตกต่างกัน เมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามภายหลังการเก็บ

รักษานาน 5 สัปดาห์ พบว่าค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบจากแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มสูงกว่าข้าวเกรียบแป้งผสมที่มีปริมาณแป้งสาคูร้อยละ 24 ในบรรจุภัณฑ์ทั้ง 2 ชนิด ทั้งนี้อาจเนื่องจากข้าวเกรียบแป้งมันสำปะหลังมีโพรงอากาศที่ขนาดใหญ่กว่า อาจส่งผลให้ผนังเจลที่หุ้มโพรงอากาศบาง ผนังเซลล์เกิดการยุบตัว ทำให้เนื้อสัมผัสอ่อนตัวและเหนียวขึ้น ต้องใช้แรงกดมากในการทำให้ข้าวเกรียบแตกหัก ขณะที่ข้าวเกรียบแป้งผสมที่ปริมาณแป้งสาคูร้อยละ 24 มีอัตราการพองตัวน้อยกว่าและค่าแรงกดเริ่มต้นมีค่ามากกว่าแป้งมันสำปะหลัง (ทั้งนี้เป็นผลของปริมาณอะมิโลสของแป้งสาคูที่สูงกว่าในแป้งมันสำปะหลัง) ซึ่งการเพิ่มปริมาณแป้งสาคูในแป้งผสมมีผลให้อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบแป้งผสมลดลง โดยทำให้เกิดโพรงอากาศขนาดเล็กและมีจำนวนมากขึ้นเมื่อปริมาณแป้งสาคูเพิ่มขึ้น ซึ่งโพรงอากาศขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจากแป้งสาคูมีผลทำให้เกิดความสม่ำเสมอของโพรงอากาศในแผ่นข้าวเกรียบแป้งผสมหลังทอด ส่งผลให้โครงสร้างเนื้อสัมผัสของข้าวเกรียบแป้งผสมมีความแข็งแรง ทำให้การอ่อนตัวลงของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบแป้งผสมเนื่องจากปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นระหว่างการเก็บรักษา มีการเปลี่ยนแปลงช้ากว่า จึงอาจทำให้ค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบแป้งผสมมีอัตราการเพิ่มขึ้นช้ากว่าข้าวเกรียบจากแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว ดังนั้นจากผลดังกล่าวอาจจะมีผลให้ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบที่มีการผสมแป้งสาคูทดแทนแป้งมันสำปะหลังสามารถคงความกรอบได้นานกว่าเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษานานขึ้น



ภาพที่ 26 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงกดของเนื้อสัมผัสข้าวเกรียบหลังทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0 และ 24 ภายหลังผ่านการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°ซ ระยะเวลานาน 60 นาที ในถุงโพลีโพรพิลีนและถุงอะลูมิเนียมลามิเนต ระหว่างการเก็บรักษา 5 สัปดาห์

Changes in compression force of fried cracker produced from the mixture between cassava and sago starches with different levels of sago starch added (0 and 24%) steamed at 100°C for 60 min in polypropylene (PP) and aluminum laminate (AL) bags during storage time for 5 weeks

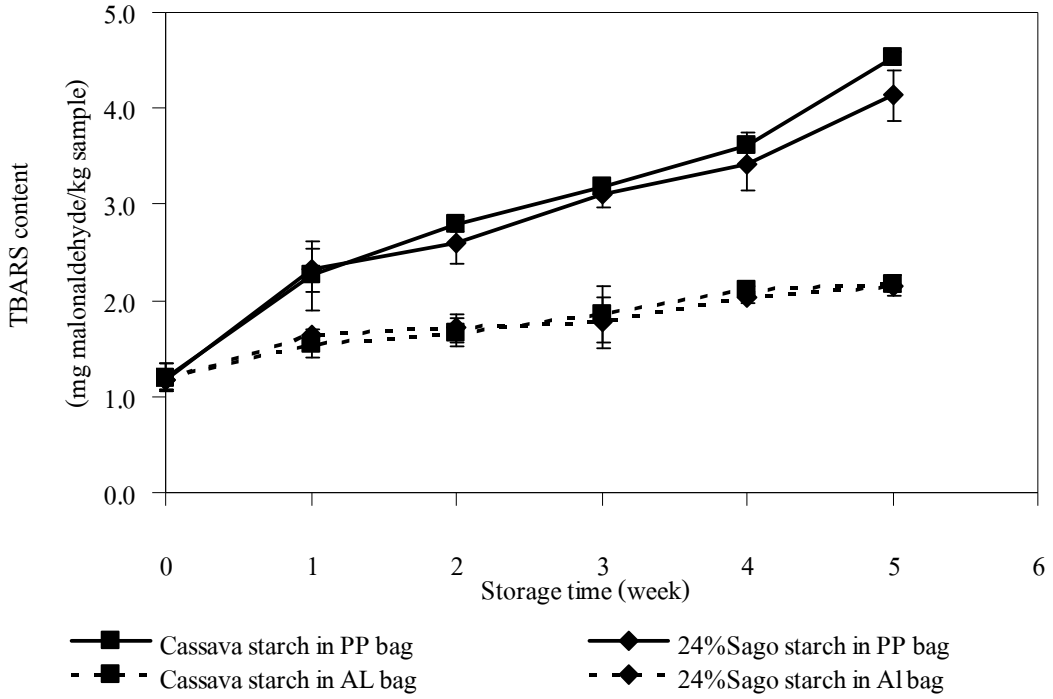
Note: All fried crackers were prepared by steaming the starch mixtures at 100°C for 60 min, followed by drying at 55-60°C for 3-4 h and frying at 190-200°C for 25 sec.

4.3 ค่า TBARS

ผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณ TBARS ของข้าวเกรียบแป้งมันสำปะหลังและข้าวเกรียบแป้งผสมที่มีปริมาณแป้งสาคูร้อยละ 24 ในระหว่างการเก็บรักษา (ภาพที่ 27) พบว่าชนิดของบรรจุภัณฑ์ และระยะเวลาการเก็บรักษามีผลต่อค่า TBARS ของข้าวเกรียบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางภาคผนวกที่ 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 ($p \leq 0.05$) (ตารางภาคผนวกที่ 14) ซึ่งค่า TBARS เป็นดัชนีบ่งบอกถึงการกลิ่นหืนของผลิตภัณฑ์ที่มีไขมันเป็นองค์ประกอบ อันเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทั้งนี้เนื่องจากข้าวเกรียบผ่านกระบวนการทอดในน้ำมันที่อุณหภูมิสูง ทำให้มีน้ำมันแทรกอยู่ภายใน ซึ่งการเก็บรักษาโดยบรรจุในถุงอะลูมิเนียมลามิเนตที่มีคุณสมบัติป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ ก๊าซออกซิเจน และป้องกันแสงผ่านได้ดี ทำให้สามารถช่วยลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน ส่งผลให้การเกิดการหืนของข้าวเกรียบในถุงอะลูมิเนียมมีค่าน้อยกว่าตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ดังนั้นชนิดของบรรจุภัณฑ์จึงมีผลต่อค่าการหืน เนื่องจากส่งผลต่อปริมาณความชื้น การซึมผ่านของออกซิเจน และแสง ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในระหว่างการเก็บรักษา

สำหรับชนิดของแป้งไม่มีผลต่อค่า TBARS ของข้าวเกรียบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) (ตารางภาคผนวกที่ 14) โดยข้าวเกรียบทั้ง 2 ชนิด ที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ชนิดเดียวกัน คือ ถุงโพลีโพรพิลีนและถุงอะลูมิเนียมลามิเนต มีค่า TBARS ไม่แตกต่างกัน ซึ่งข้าวเกรียบแป้งมันสำปะหลังและข้าวเกรียบแป้งผสมที่ปริมาณแป้งสาคูร้อยละ 24 ที่บรรจุในถุงโพลีโพรพิลีนและถุงอะลูมิเนียมลามิเนตมีค่า TBARS เฉลี่ยเท่ากับ 4.53, 4.13 และ 2.18, 2.15 มิลลิกรัม (ภาพที่ 27) มาโลนอัลดีไฮด์ต่อกิโลกรัมของตัวอย่าง ตามลำดับ ภายหลังระยะเวลาการเก็บรักษานาน 5 สัปดาห์

จากการทดลองมีความสอดคล้องกับการศึกษาของณัฐนันทน์ ชุมแก้ว (2543) ซึ่งกล่าวว่าค่าทีบีเอของผลิตภัณฑ์ข้าวพองเสริมใยอาหารมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาในการเก็บรักษา ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันในกระบวนการออกซิเดชัน และจากการศึกษาของอัมพวัน ลิขิตหัตถศิลป (2547) พบว่าผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊บสดและทอดเกิดออกซิเดชันของไขมันตลอดเวลาในการเก็บรักษา ทั้งนี้เนื่องจากการเหนี่ยวนำของออกซิเจนให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้น ส่งผลให้ค่า TBARS เพิ่มเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น



ภาพที่ 27 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TBARS ของข้าวเกรียบหลังทอดซึ่งเตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคูที่มีปริมาณแป้งสาคูเป็นส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0 และ 24 ภายหลังผ่านการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°ซ ระยะเวลานาน 60 นาที ในถุงโพลีโพรพิลีนและถุงอะลูมิเนียมลามิเนต ระหว่างการเก็บรักษา 5 สัปดาห์

Changes in TBARS content force of fried cracker produced from the mixture between cassava and sago starches with different levels of sago starch added (0 and 24%) steamed at 100°C for 60 min in polypropylene (PP) and aluminum laminate (AL) bags during storage time for 5 weeks

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