

บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

ข้าวเกรียบเป็นผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวที่มีการผลิตกันมากในประเทศไทย ซึ่งโดยทั่วไปในผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบจะใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนผสมหลักในการผลิต โดยผสมกับส่วนผสมอื่นๆ เช่น เนื้อปลาหรือกุ้ง และเกลือ นึ่งให้สุกบางส่วน นวดให้เข้ากัน แล้วปั้นโดเป็นท่อนยาว ทำให้สุกโดยการนึ่งหรือต้มในน้ำเดือด นำขึ้นผึ่งลมให้แห้ง หั่นเป็นชิ้นบางๆ ตากแดดจนแห้ง แล้วบรรจุลงจำหน่าย การผลิตข้าวเกรียบในพื้นที่ภาคใต้ตอนล่าง นอกจากจะใช้แป้งมันสำปะหลังแล้วยังมีการผสมแป้งสาकुทดแทนแป้งมันสำปะหลังบางส่วน ซึ่งทำให้โคที่ได้นั้นง่ายและข้าวเกรียบหลังทอดจะมีความกรอบนานกว่าข้าวเกรียบที่มีเฉพาะแป้งมันสำปะหลังอย่างเดียว ซึ่งข้าวเกรียบที่ทำจากแป้งมันสำปะหลังจะมีความหนาแน่น (Bulk density) ต่ำ การพองตัวมีลักษณะกรอบเบาแต่จะกรอบไม่นาน การผสมแป้งข้าวเจ้าหรือแป้งสาลี ทดแทนแป้งมันสำปะหลังจะทำให้ข้าวเกรียบมีความกรอบอยู่ได้นานขึ้น (เพลินใจ ดังคณะกุล, 2546) ดังนั้นการนำแป้งสาकुทดแทนแป้งมันสำปะหลังในส่วนผสมของข้าวเกรียบจากภูมิปัญญาท้องถิ่น จึงส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

คุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารจากแป้งมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้ง เช่น การพองตัว การละลาย การเกิดเจลลิตในเซชัน การเกิดรีโทรเกรเดชัน และความหนืด ซึ่งมีความแตกต่างกันไปตามชนิดของแป้งเนื่องจากมีความแตกต่างในขนาดของเม็ดแป้ง สัดส่วนของปริมาณอะมิโลสและอะมิโลเพคติน ขนาดความยาวของสายโมเลกุลอะมิโลสและอะมิโลเพคติน รวมถึงองค์ประกอบอื่นๆ ในแป้ง เช่น ไขมันและโปรตีน สมบัติเหล่านี้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแป้งในระหว่างการผลิตและต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สมบัติของแป้งมีความจำเพาะตามชนิดและแหล่งที่มาของแป้งนั้นๆ แต่มีผลิตภัณฑ์หลายอย่างที่มีการนำแป้งมากกว่า 1 ชนิดเป็นส่วนผสม ซึ่งสมบัติของแป้งผสม อาจจะต่างไปจากแป้งเดิมโดยสิ้นเชิง เช่น ในกรณีของข้าวเกรียบที่ผลิตในภาคใต้ตอนล่างได้มีการใช้แป้งสาकुผสมกับแป้งมันสำปะหลัง เพื่อให้ได้ข้าวเกรียบที่กรอบนานขึ้น คุณภาพของข้าวเกรียบที่สำคัญคือ คุณลักษณะของเนื้อสัมผัสด้านความกรอบและการพองตัวของผลิตภัณฑ์ แป้งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพ

ของข้าวเกรียบ โดยลักษณะเนื้อสัมผัสและการพองตัวของผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างอะมิโลสและอะมิโลเพกติน หากโมเลกุลอะมิโลเพกตินสูง จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นต่ำและเปราะ แต่อะมิโลสจะช่วยลดปัญหาการแตกหักของผลิตภัณฑ์ (Feldberg, 1969) ดังนั้นการศึกษาสมบัติของแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสากุที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบ รวมทั้งความเข้าใจถึงอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในระหว่างการแปรรูปมีความสำคัญมากในการอธิบายผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์สุดท้าย ทำให้จึงเป็นประเด็นที่น่าศึกษาวิจัย แต่อย่างไรก็ตามในขณะนี้ยังไม่มีการศึกษาว่าแป้งสากุสามารถช่วยปรับปรุงความกรอบและคงความกรอบของข้าวเกรียบได้นานขึ้นอย่างไรในเชิงสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ และแป้งสากุมีผลต่อการพองตัวของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบหรือไม่ รวมถึงการใช้สัดส่วนแป้งทั้งสองชนิดที่แตกต่างกันจะส่งผลอย่างไรต่อคุณภาพข้าวเกรียบ

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของสมบัติของแป้งที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยจะศึกษาสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งผสมระหว่างแป้งสากุและแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วนต่างๆ ศึกษาผลของการใช้แป้งสากุผสมแป้งมันสำปะหลังต่อการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างการผลิตในขั้นตอนต่างๆ และต่อสมบัติของข้าวเกรียบแป้งผสม รวมทั้งศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งผสมกับสมบัติของข้าวเกรียบที่ได้ ในเรื่องความกรอบและการพองตัว เป็นต้น ซึ่งผลที่คาดว่าจะได้รับคือองค์ความรู้เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของแป้งผสมต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบ

ตรวจเอกสาร

1. ลักษณะและแหล่งของแป้งสากุและแป้งมันสำปะหลัง

1.1 แป้งสากุ (Sago starch)

สากุ (Sago palm) จัดเป็นพืชในตระกูลปาล์ม Genus *Metroxylon* ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ สากุชนิดที่ไม่มีหนาม (*Metroxylon sago* Rottb.) และสากุชนิดที่มีหนาม (*Metroxylon rumphii* Mart.) ซึ่งสากุโดยส่วนใหญ่เป็นชนิดที่ไม่มีหนาม สากุจัดเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว (Monocotyledon) ลำต้นสูงประมาณ 8-10 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นประมาณ 18 นิ้ว สามารถปลูกได้ง่าย ขยายพันธุ์ด้วยหน่อหรือเมล็ด ดอกมีเกสรตัวผู้และเกสรตัวเมียอยู่ในต้นเดียวกัน (เป็นจันจुวา, 2542) เจริญได้ดีในที่ลุ่มน้ำขัง บริเวณป่าพรุหรือริมแม่น้ำต่างๆ สากุเป็นพืชพื้นเมืองที่พบว่ามี การปลูกกันมากในเขตพื้นที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้และหมู่เกาะต่างๆ ในแถบมหาสมุทรแปซิฟิก

เช่น อินโดนีเซีย มาเลเซีย ปากัวนิวกินี ฟิลิปปินส์และทางภาคใต้ของไทย (นพรัตน์ บำรุงรักษ์, 2536) โดยเฉพาะในประเทศอินโดนีเซียและมาเลเซีย สาขาคัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญและได้มีการผลิตแป้งจากต้นสาขาคัดในระดับอุตสาหกรรมและมีการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และคณะ, 2542) ในประเทศไทย สาขาคัดเป็นพืชท้องถิ่นชนิดหนึ่ง โดยส่วนใหญ่จะเป็นชนิดไม่มีหนามและพบมากในบริเวณภาคใต้ตอนล่าง ได้แก่ จังหวัด นครศรีธรรมราช พัทลุง สงขลา ปัตตานี ยะลา และนราธิวาส (ปิ่น จันจุฬา, 2542) ซึ่งในประเทศไทยยังไม่มีการผลิตหรือใช้ประโยชน์แป้งสาขาคัดในระดับอุตสาหกรรม

แป้งสาขาคัดได้จากส่วนของลำต้น ซึ่งเมื่ออายุแก่เต็มที่ (ตั้งแต่ 8 ปีขึ้นไป) ลำต้นสาขาคัดจะมีปริมาณแป้งสูงสุดอยู่ในส่วนกลางของลำต้น แป้งจะถูกเก็บไว้ในคลอโรพลาสต์ในเซลล์ของส่วนแกนลำต้นสาขาคัด (Pith) โดยด้านนอกจะเป็นเปลือกและเส้นใย ซึ่งมีความหนาประมาณ 2.0-2.5 ซม. จากการศึกษาของ Piyachomkwan (1999) พบว่าส่วนของลำต้นที่มีอายุเหมาะสมสำหรับใช้สกัดแป้งได้จะมีปริมาณส่วนของเนื้อร้อยละ 75 และเป็นส่วนเปลือกร้อยละ 25 โดยในส่วนของเนื้อจะมีความชื้นอยู่ประมาณร้อยละ 50 ซึ่งปริมาณแป้งถ้าพิจารณาในส่วนของลำต้นสาขาคัดที่ปอกเปลือกแล้วจะสามารถผลิตแป้งได้คิดเป็นร้อยละ 34-40 ของน้ำหนักแห้ง (ไพรัตน์ โสภโณดร, 2530)

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของแป้งในลำต้นสาขาคัด พบว่าลำต้นสาขาคัดนั้นมีปริมาณของแป้งสาขาคัดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยเฉลี่ยมีแป้งอยู่ร้อยละ 82.7 ของน้ำหนักแห้ง (Piyachomkwan *et al.*, 1999) และจากการศึกษาของ Kumkanokrat (2001) พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างแป้งสาขาคัด (Flour) จะประกอบด้วยส่วนของแป้ง (Starch) อยู่ร้อยละ 88.56 ของน้ำหนักแห้ง

1.2 แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch)

มันสำปะหลัง (Cassava) จัดเป็นพืชอยู่ในตระกูล Euphobiaceae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot esculenta* Crantz. แต่เดิมมีชื่อว่า *Manihot utilisima* Pohl. มันสำปะหลังจัดเป็นพืชใบเลี้ยงคู่ โดยในประเทศอินเดียและประเทศมาเลเซีย จะเรียกว่า Tapioca มันสำปะหลังถือเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ซึ่งประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกผลิตภัณฑ์จากแป้งมันสำปะหลังรายใหญ่ที่สุดของโลก โดยปริมาณการผลิตแป้งมันสำปะหลังส่งออกของประเทศไทยในปี 2550 ประมาณ 2.3 ล้านตันต่อปี และการส่งออกผลิตภัณฑ์จากแป้งมันสำปะหลังอยู่ที่ประมาณ 3.5 ล้านตันต่อปี (The Thai Tapioca Starch Association, 2007) ซึ่งแหล่งผลิตมันสำปะหลังที่สำคัญอยู่ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศ (จำลอง เขียมจันรรจา, 2547)

การผลิตแป้งมันสำปะหลัง ใช้วิธีการผลิตอย่างต่อเนื่อง หัวมันสำปะหลังจะถูกลำเลียงส่งเข้าเครื่องจักรในแต่ละชุดติดต่อกันไปเรื่อยๆ โดยผ่านเครื่องจักรแต่ละชุดวัตถุดิบก็จะถูก

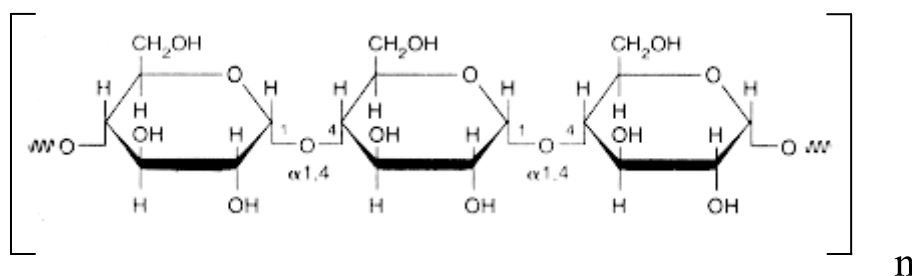
แปรสภาพไปเรื่อยๆ โดยมีขั้นตอนเริ่มจากการทำความสะอาด การสับและการโม่ การแยกโปรตีน และพวกยางหรือเมือก การแยกกากมัน การสกัดน้ำออก และสุดท้ายเป่าลมให้แห้ง แล้วทำให้เย็น บรรจุถุง โดยสัดส่วนของผลผลิตเมื่อเทียบกับวัตถุดิบได้ดังนี้พบว่า หัวมันสดน้ำหนัก (แป้งร้อยละ 20) 1 ตัน จะได้แป้งมันสำปะหลังโดยเฉลี่ยน้ำหนัก 250 กิโลกรัม กากมันสำปะหลัง 60 กิโลกรัม (สมชาย เขียรสวัสดิ์กิจ, 2531) และจากการศึกษาของ Aryee และคณะ (2005) พบว่าแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณโดยเฉลี่ยอยู่ระหว่างร้อยละ 70-82 โดยน้ำหนัก

2. องค์ประกอบของแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน โดยมีสูตรเคมีทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และ 4 ภายในเม็ดแป้งจะประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะมิโลสและอะมิโลเพกติน ซึ่งแป้งแต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินแตกต่างกัน ทำให้แป้งมีคุณสมบัติแตกต่างกันด้วย (Whistler and Bemiller, 1999)

2.1 อะมิโลส (Amylose)

อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์สายตรงที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 250-2,000 หน่วย (ภาพที่ 1) มาเชื่อมต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะ α -1,4-Glycosidic linkage (Zobel and Stephen, 1995) โมเลกุลอะมิโลสจะมีน้ำหนักประมาณ 10^6 ดาลตัน ซึ่งแป้งแต่ละชนิดมีขนาดโมเลกุล (Degree of polymerization, DP) ของอะมิโลสแตกต่างกัน แป้งที่มีโมเลกุลอะมิโลสสายยาวจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรดชันลดลง (Whistler and Bemiller, 1999)



ภาพที่ 1 โครงสร้างอะมิโลส

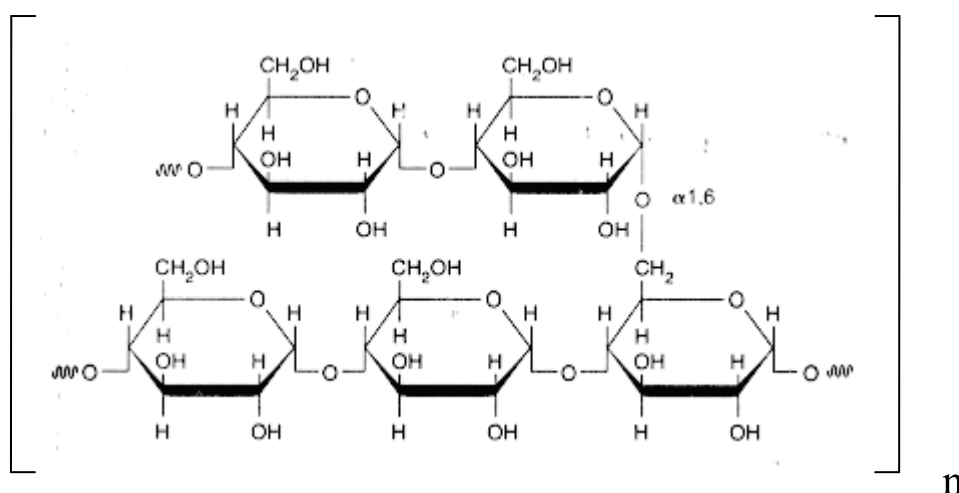
The structure of amylose

ที่มา: Roskoski (1996)

อะมิโลสสามารถดูดความชื้นและกระจายตัวในน้ำได้ดี เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งจนเม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ โมเลกุลอะมิโลสจะกระจายออกมาจากเม็ดแป้ง ทำให้มีความหนืดลดลง เมื่อเย็นตัวลงเกิดการคืนตัวมากโมเลกุลจะรวมตัวกัน ถ้าสารละลายแป้งมีความเข้มข้นน้อย การรวมตัวกันของอะมิโลสจะทำให้เกิดการตกตะกอน แต่ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นของแป้งมาก การรวมตัวกันของอะมิโลสจะทำให้เกิดเจล อะมิโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนซึ่งจะให้สีน้ำเงิน ซึ่งใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บอกถึงว่าแป้งมีองค์ประกอบอะมิโลสอยู่ (Whistler and Bemiller, 1999)

2.2 อะมิโลเพคติน (Amylopectin)

อะมิโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ซึ่งสายพอลิเมอร์เกิดจากหน่วยกลูโคสมาเชื่อมต่อกัน โดยประกอบด้วยส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-Glucosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาสายสั้นประกอบด้วยหน่วยกลูโคสจำนวน 10-60 หน่วย (ภาพที่ 2) โดยเชื่อมต่อกับส่วนที่เป็นสายตรงด้วยพันธะ α -1,6-Glucosidic linkage (Zobel and Stephen, 1995) อะมิโลเพคตินจะมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน และมีอัตราการคืนตัวต่ำเนื่องจากมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขา ดังนั้นโอกาสที่โมเลกุลของอะมิโลเพคตินจับกันเองเกิดขึ้นได้น้อย เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งที่มีปริมาณอะมิโลเพคตินสูง แป้งเปียกที่ได้จะใส มีความหนืดสูง ซึ่งโมเลกุลของอะมิโลเพคตินเมื่อรวมกับสารไอโอดีนจะเกิดเป็นสารประกอบสีแดง (Whistler and Bemiller, 1999)



ภาพที่ 2 โครงสร้างอะมิโลเพคติน

The structure of amylopectin

ที่มา: Roskoski (1996)

จากการศึกษาของ Ahmad และคณะ (1999) พบว่าแป้งสาकुมีปริมาณอะมิโลสเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 24-31 และจากการศึกษาของนพรัตน์ บำรุงรักษ์ (2536) รายงานว่าแป้งสาकुประกอบด้วยอะมิโลสร้อยละ 27 และเป็นส่วนของโมเลกุลอะมิโลเพคตินร้อยละ 73 Piyachomkwan และคณะ (1999) รายงานว่าจากการวิเคราะห์หาปริมาณอะมิโลสและขนาดโมเลกุลของอะมิโลสจากส่วนของลำต้นสาकुจาก 4 ส่วน คือส่วนล่าง ส่วนกลาง 2 ส่วน และส่วนปลายของลำต้น พบว่าปริมาณอะมิโลสของแต่ละส่วนของลำต้นสาकुมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 18.0-20.9 และขนาดของโมเลกุลโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 2,500-2,800 หน่วยกลูโคส

แป้งมันสำปะหลังจึงจัดว่าเป็นแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสค่อนข้างต่ำ Defloor และคณะ (1998) รายงานว่าแป้งมันสำปะหลังจะมีปริมาณอะมิโลสเฉลี่ยอยู่ระหว่างร้อยละ 17.9-23.6 เช่นเดียวกันกับการศึกษาของ Pongsawatmanit และคณะ (2002) พบว่าแป้งมันสำปะหลังมีอะมิโลสเป็นองค์ประกอบโดยเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 17.0 และมีขนาดของโมเลกุล (Degree of polymerization) เท่ากับ 2,760 หน่วยกลูโคส และจากการศึกษาของ Li และ Yeh (2001) รายงานว่า แป้งมันสำปะหลังมีปริมาณของอะมิโลสเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 19.9 ซึ่งแป้งดิบโดยทั่วไปจะประกอบด้วยส่วนของโมเลกุลอะมิโลสอยู่ร้อยละ 20 และเป็นส่วนโมเลกุลของอะมิโลเพคตินร้อยละ 80 (Jenkins and Donald, 1995) โมเลกุลอะมิโลสและอะมิโลเพคตินในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลของแต่ละสาย ตำแหน่งที่อยู่ในเม็ดแป้ง และสัดส่วนของโมเลกุลอะมิโลสต่ออะมิโลเพคตินที่แตกต่างกัน

2.3 โปรตีน (Protein)

ภายในเม็ดแป้งมีส่วนประกอบของโปรตีนอยู่ต่ำกว่าร้อยละ 1 พบอยู่บริเวณขอบหรือฝังอยู่ภายในเม็ดแป้ง มีผลทำให้เกิดประจุบนพื้นผิวเม็ดแป้ง โดยพันธะไดซัลไฟด์ในโปรตีนที่เกาะเกี่ยวกับเม็ดแป้งทำให้แรงยึดเหนี่ยวภายในแป้งเพิ่มสูงขึ้น (Hamaker and Griffin, 1993) ซึ่งมีผลต่อการกระจายของเม็ดแป้ง ความหนืดของเม็ดแป้ง อัตราการดูดซับน้ำ อัตราการพองตัว และอัตราการเกิดเจลลาติไนเซชันลดลง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)

2.4 ไขมัน (Lipid)

ส่วนใหญ่แป้งมีองค์ประกอบของไขมันอยู่ต่ำกว่าร้อยละ 1 โดยพบอยู่ใน 2 ลักษณะคือ อยู่บริเวณผิวหรือขอบของเม็ดแป้ง ได้แก่ ไตรกลีเซอไรด์ กรดไขมันอิสระ และฟอสโฟไลปิด รวมทั้งไขมันที่กระจายอยู่ภายในเม็ดแป้ง โดยไขมันในเม็ดแป้งจะรวมตัวกับโมเลกุลของอะมิโลสเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน เกิดเป็นโครงสร้างผลึกอย่างอ่อนไปเสริมความแข็งแรงให้แก่เม็ดแป้ง (Kasemsuwan *et al.*, 1998) ส่งผลกระทบต่อลักษณะและ

คุณสมบัติของแป้ง โดยจะลดความสามารถในการพองตัว การละลายและการจับตัวกับน้ำของแป้ง ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นทำให้ได้ฟิล์มและแป้งเปียกมีลักษณะทึบแสงหรือขุ่น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)

2.5 เถ้า (Ash)

ปริมาณเถ้าจะเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณสารอนินทรีย์ ซึ่งแป้งโดยทั่วไปมีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม เป็นต้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)

Ahmad และคณะ (1999) ตรวจสอบวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งสาकु 11 ตัวอย่าง พบว่าแป้งสาकुมีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 10.6-20.0 เถ้าร้อยละ 0.06-0.43 ไขมันร้อยละ 0.10-0.13 เส้นใยร้อยละ 0.26-0.32 และปริมาณโปรตีนมีอยู่ร้อยละ 0.19-0.25 เช่นเดียวกันกับการศึกษาของ Kumkanokrat (2001) ซึ่งวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งสาकु พบว่าแป้งสาकुมีความชื้นร้อยละ 10.95 โปรตีนร้อยละ 0.13 ไขมันร้อยละ 0.12 เถ้าร้อยละ 0.13 และเส้นใยร้อยละ 0.11 ตามลำดับ Pongsawatmanit และคณะ (2002) ตรวจสอบวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง พบว่าแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณความชื้นอยู่เท่ากับร้อยละ 12.27 โปรตีนร้อยละ 0.11 ไขมันร้อยละ 0.07 เส้นใยร้อยละ 0.12 และเถ้าร้อยละ 0.25 และจากการศึกษาของ Asaoka และคณะ (1991) รายงานว่าแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณโปรตีนอยู่ร้อยละ 0.05-0.28 ไขมันร้อยละ 0.00-0.78 และเถ้าร้อยละ 0.02-0.33

3. สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้ง

3.1 ลักษณะรูปร่างและขนาดของเม็ดแป้ง

เม็ดแป้งสาकुมีลักษณะรูปร่างคล้ายรูปไข่ที่มีรอยตัด (Ahmad *et al.*, 1999; Sim *et al.*, 1991) ขนาดของเม็ดแป้งสาकुมีตั้งแต่ 20-50 ไมครอน (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 35 ไมครอน) ซึ่งเม็ดแป้งสาकुมีขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งชนิดอื่น เช่น แป้งข้าวโพด แป้งข้าวสาลี แป้งข้าวเจ้า และแป้งมันสำปะหลัง แต่มีขนาดเล็กกว่าแป้งมันฝรั่ง (Piyachomkwan *et al.*, 1999) อย่างไรก็ตามขนาดของเม็ดแป้งจะขึ้นอยู่กับอายุของลำต้นสาकुที่นำมาสกัดและส่วนของลำต้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และคณะ, 2542)

สำหรับแป้งมันสำปะหลังเมื่อตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แป้งมันสำปะหลังจะมีรูปร่างเป็นเม็ดทรงกลมและปลายด้านหนึ่งเป็นรอยตัด (Rickard *et al.*, 1991;

Sriroth *et al.*, 1999) จากการศึกษาของ Defloor และคณะ (1998) รายงานว่าแป้งมันสำปะหลังมีขนาดเม็ดแป้งอยู่ในช่วงระหว่าง 3-32 ไมครอน ซึ่งสภาวะแวดล้อมในการเพาะปลูกมีผลต่อขนาดเม็ดแป้ง โดยในสภาวะแล้งแป้งมันสำปะหลังจะมีขนาดของเม็ดแป้งเล็กกว่าสภาวะที่มีฝน โดยมีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยระหว่าง 9.5-12.7 ไมครอน และ 11.8-13.6 ไมครอน ตามลำดับ

3.2 ลักษณะโครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง

เม็ดแป้งมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินจะจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งเป็น โครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline region) และส่วนอสัณฐาน (Amorphous region หรือ Gel phase) ซึ่งส่วนสายโซ่สั้นของอะมิโลเพกตินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวม้วนคู่ (Double helices) ระหว่างโมเลกุลด้วยพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ รวมกันเป็นกลุ่ม (Cluster) ซึ่งการเรียงตัวอย่างมีระเบียบทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นผลึก (Jenkins and Donald, 1995) ส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งจะประกอบด้วย โมเลกุลของอะมิโลสและสายโซ่ยาวของอะมิโลเพกติน เม็ดแป้งจะมีลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งเป็น 3 แบบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ถ้าเกิดการเรียงตัวหนาแน่นมากจะเกิดเป็นผลึกแบบ A พบได้ในแป้งจากธัญพืช ถ้าเรียงตัวกันหลวมๆ จะเกิดผลึกแบบ B โดยจะพบได้ในแป้งจากพืชตระกูลหัว ถ้าแป้งมีการจัดเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C ซึ่งพบได้ในแป้งจากพืชตระกูลถั่ว (Jenkins and Donald, 1995) ซึ่งสามารถตรวจสอบชนิดโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งได้โดยเทคนิคของการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ (X-ray diffraction, XRD) การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD ของแป้งดิบหรือแป้งที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการแปรรูปที่มีผลให้แป้งสุกจะแสดงให้เห็นฟิสิกบนดิฟเฟรคโตแกรม ซึ่งแสดงถึงความเป็นผลึก และหากแป้งผ่านกระบวนการทำให้สุกหรือกระบวนการเกิดเจลลิตีในเซชันมีผลให้โครงสร้างผลึกในเม็ดแป้งถูกทำลายฟิสิกเหล่านี้จะหายไป นอกจากการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD การที่เม็ดแป้งมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นผลึกเมื่อนำมาส่องด้วยกล้องโพลาไรซ์ เม็ดแป้งจะมีคุณสมบัติในการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ หรือเรียกว่า ไบรฟรินเจนซ์ (Birefringence) ทำให้มองเห็นลักษณะคล้ายเครื่องหมายกากบาทสีดำทึบ ซึ่งเรียกว่า มอลติสครอส (Maltese cross) (Whistler and Bemiller, 1999) เมื่อให้ความร้อนกับแป้งหรือเม็ดแป้งที่ผ่านการเกิดเจลลิตีในเซชัน โดยสมบูรณ์จะสูญเสียลักษณะไบรฟรินเจนหรือลักษณะมอลติสครอสของแป้งจะหายไป (Blanshard, 1987; Hoover, 2001; Pomeranz, 1991; Singh *et al.*, 2003)

Ahmad และคณะ (1999) วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งสาकु โดยใช้เทคนิคการหักเหของแสงโดยใช้เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) พบว่าเม็ดแป้งสาकुมีลักษณะการจัดเรียงโครงสร้างผลึกเป็นแบบ C ซึ่งเกิดจากลักษณะร่วมกันระหว่างโครงสร้างผลึกแบบ A และ B โดยเม็ดแป้งสาकुมีโครงสร้างที่เป็นผลึกแบบ A และ B เท่ากับร้อยละ 65 และร้อยละ 35 ตามลำดับ โดยลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ C จะพบจากแป้งที่ค่อนข้างมีปริมาณอะมิโลสสูง (เช่น แป้งจากพืชตระกูลถั่ว) ซึ่งจะเหมือนกับแป้งสาकु

Kasemsuwan และคณะ (1998) ศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งมันสำปะหลังและแป้งถั่วเขียวด้วยเครื่อง X-ray diffractometer พบว่าแป้งถั่วเขียวจะมีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบ A แต่แป้งมันสำปะหลังจะให้ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ C_A (ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ C ที่ใกล้เคียงแบบ A) ทั้งนี้เป็นผลจากแป้งมันสำปะหลังจะมีส่วนของผลึกมากกว่าแป้งถั่วเขียวซึ่งจะมีปริมาณอะมิโลสสูงกว่า (ร้อยละ 37.0)

ในขณะที่การศึกษาของ Sriburi (1999) รายงานว่าลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งสาकुและแป้งมันสำปะหลัง จะมีลักษณะโครงสร้างผลึกเหมือนกลุ่มของแป้งจากธัญพืช คือมีโครงสร้างผลึกแบบ A เช่นเดียวกับแป้งสาลี แป้งข้าวโพด แป้งข้าวเจ้า และแป้งข้าวโอ๊ต

3.3 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย

แป้งที่พบในธรรมชาติจะมีขนาด รูปร่างและลักษณะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของแป้งนั้นๆ โครงสร้างของเม็ดแป้งจะประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมากบริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้ง ซึ่งเป็นส่วนอสังฐาน ทำให้น้ำหรือของเหลวสามารถแพร่เข้าไปในเม็ดแป้งได้อย่างอิสระ เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำจนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับความชื้นภายนอก ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งแป้งทั่วไปเมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศจะมีความชื้นอยู่ระหว่างร้อยละ 10-17 (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543) ดังนั้นในขณะที่แป้งดิบอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะสามารถดูดซึมและสามารถพองตัวได้เล็กน้อย (Leach *et al.*, 1959) แต่เมื่อเม็ดแป้งถูกทำลายหรือถูกทำให้เปลี่ยนแปลงสภาพไปจากปกติ โดยกระบวนการต่าง ๆ เช่น การลดขนาดเม็ดแป้ง การทำให้เกิดเจลาตินในเซชัน เป็นต้น จะส่งผลให้เม็ดแป้งสามารถดูดซับน้ำและพองตัวได้ดีกว่าเม็ดแป้งดิบ (Tongdang, 2001)

การพองตัวและการละลาย แป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของเจลาตินในเซชันเนื่องจากโมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) จำนวนมากและจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนอย่างแน่นหนา ซึ่งพันธะไฮโดรเจนเกิดจากการที่หมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้กันเชื่อมต่อกัน (Eliasson and Gudmundsson, 1996) แต่

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งให้สูงกว่าอุณหภูมิเจลลิตในเซชัน พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวขึ้นและบางส่วนของแป้งจะละลายออกมา ทำให้การละลาย ความหนืด และความใสเพิ่มขึ้น โดยกำลังการพองตัวของแป้งจะแสดงเป็นปริมาตรและน้ำหนักของเม็ดแป้งที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเม็ดแป้งพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ สำหรับความสามารถในการละลายจะแสดงเป็นน้ำหนักของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่สามารถละลายได้ (Schoch, 1964)

Tester and Morrison (1990a, b) รายงานว่า การพองตัวของแป้งเกิดจากการสูญเสียการจัดระเบียบภายในโครงสร้างผลึกของโมเลกุลอะมิโลเพกติน เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นเกลียวคู่ของอะมิโลเพกตินจะแยกออกจากกันและโมเลกุลบางส่วนละลายออกมาเมื่อเม็ดแป้งเกิดเจลลิตในเซชัน ทำให้ลักษณะโครงสร้างไบร์พรินเจนซ์ของแป้งหายไปหมด

Kumkanokrat (2001) ศึกษาการพองตัวและการละลายของแป้งสาकु พบว่าการพองตัวของเม็ดแป้งจะเพิ่มจากอุณหภูมิ 60°C จนถึงอุณหภูมิ 90°C ส่วนค่าการละลายของแป้งสาकुจะมีการเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ 60°C จนถึงอุณหภูมิ 95°C โดยค่าการละลายจะมีความสัมพันธ์กับการพองตัวของแป้งสาकु ซึ่งความสามารถในการพองตัวของแป้งสาकुจะมีลักษณะคล้ายกับแป้งมันฝรั่งหรือแป้งมันสำปะหลังแต่จะมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวโพด (Ahmad and Williams, 1998) Piyachomkwan และคณะ (1999) ศึกษาการพองตัวของแป้งสาकुที่สกัดได้จากส่วนของลำต้นสาकुที่แบ่งเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนล่างของลำต้น ส่วนของกลางของลำต้น 2 ส่วน และส่วนปลายของลำต้นสาकु โดยพบว่าค่ากำลังการพองตัวของแป้งสาकुที่สกัดได้จากส่วนต่างๆ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยเริ่มพองตัวที่อุณหภูมิ 60°C และค่ากำลังการพองตัวสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งแป้งสาकुมีค่ากำลังการพองตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 90°C และค่าการละลายก็จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเหมือนกับค่ากำลังการพองตัว จากรายงานของ Li และ Yeh (2001) ศึกษาการพองตัว (Swelling power) ของแป้งจากธัญพืช พืชหัว พืชราก และแป้งจากถั่ว โดยนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 55-95°C พบว่า ค่ากำลังการพองตัวจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น โดยลักษณะรูปแบบการพองตัวของแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังจะมีลักษณะคล้ายกันทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างมีการจัดเรียงตัวหลวม ๆ หรือมีช่องว่าง ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะของเม็ดแป้งอ่อนแอเมื่อเกิดการเจลลิตในเซชัน ทำให้โมเลกุลของแป้งมีความสามารถในการจับกับน้ำสูงขึ้น ซึ่งกำลังการพองตัวของแป้งจะขึ้นอยู่กับปริมาณของอะมิโลเพกติน โดยค่ากำลังการพองตัวจะลดลงเมื่อปริมาณอะมิโลสเพิ่มขึ้น (Sasaki and Matsuki, 1998)

ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้งมีด้วยกันหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนในเม็ด

ที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในสภาวะที่เกิดการพองตัว คุณสมบัติหลังการตัดัดแปรแปรงทางเคมี (Leach *et al.*, 1959)

3.4 การเกิดเจลาตินในเซชัน

เจลาตินในเซชันเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้ง จากสภาวะที่มีการจัดเรียงของโมเลกุลภายในเม็ดแป้งอย่างมีระเบียบสู่สภาวะที่ไม่เป็นระเบียบ ซึ่งเกิดจากเมื่อมีการให้ความร้อนกับสารละลายแป้งจนอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเจลาตินในเซชันของแป้ง จะทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดซับน้ำและเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ ทำให้ส่วนผสมนั้นมีความหนืดเพิ่มมากขึ้นและใสขึ้น โมเลกุลของเม็ดแป้งที่ละลายจะเริ่มละลายออกมา ทำให้เกิดการละลายขึ้น ความร้อนมีผลให้โครงสร้างผลึกถูกหลอมละลาย เม็ดแป้งจึงสูญเสียลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างส่วนที่เป็นผลึกไปเป็นส่วนไม่เป็นผลึก (Amorphous region) ทำให้เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและ โครงสร้างแบบไบรฟรินเจนส์จะหายไป ทำให้ไม่สามารถมองเห็นลักษณะมอลติสโครอสมเม็ดแป้งปรากฏอยู่ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization) (Atwell *et al.*, 1988; Blanshard, 1987; Biliaderis, *et al.*, 1980; Donovan, 1979; Evans and Haisman, 1982; Stevens and Elton, 1981; Zobel *et al.*, 1988) อุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้ง จะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีที่มีอยู่ เช่น สัดส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน ปริมาณไขมัน รวมทั้งการจัดเรียงตัวของโมเลกุลในเม็ดแป้ง กระบวนการเกิดเจลาตินในเซชัน ทำให้แป้งสูญเสียความสามารถในการเปียงเบนแสงโพลาไรซ์ เกิดการพองตัว ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น เม็ดแป้งแตกและเกิดการละลาย การเกิดเจลาตินในเซชันสามารถตรวจสอบได้โดยดูการเปลี่ยนแปลงลักษณะ โครงสร้างแบบไบฟรินเจนส์ ซึ่งสังเกตได้จากกล้องจุลทรรศน์ที่มีแสงโพลาไรซ์ นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบโดยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ซึ่งจะตรวจวัดอุณหภูมิและบันทึกการเปลี่ยนแปลงปริมาณเอนทัลปี (Enthalpy) ของแป้ง เมื่อได้รับความร้อนและการตรวจสอบช่วงอุณหภูมิของเจลาตินในเซชัน (Gelatinization temperature)

Kasemsuwan และคณะ (1998) ตรวจสอบวิเคราะห์อุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งมันสำปะหลังด้วยเครื่อง DSC พบว่าแป้งมันสำปะหลังมีค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลาตินในเซชันเท่ากับ 63.8°C ช่วงของอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ $61.5\text{--}82.2^{\circ}\text{C}$ และค่าเอนทัลปีมีค่าเท่ากับ 7.6 จูลต่อกรัม และจากการศึกษาของ Gunaratne และ Hoover (2002) รายงานว่าอุณหภูมิของการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งมันสำปะหลังจะมีค่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิ $63\text{--}81.5^{\circ}\text{C}$

จากรายงานของ Li และ Yeh (2001) ศึกษาอุณหภูมิการเกิดเจลลาติโนเซชันของแป้งมันสำปะหลังด้วยเครื่อง DSC พบว่าแป้งมันสำปะหลังมีค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลาติโนเซชัน (Onset temperature, T_o) เฉลี่ยเท่ากับ 64.5°C อุณหภูมิสูงสุดของการเกิดเจลลาติโนเซชัน (Peak temperature, T_p) มีค่าเท่ากับ 71.0°C และมีค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาติโนเซชันเท่ากับ 13.0 จูลต่อกรัม

Ahmad และคณะ (1999) ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งสาธู 11 ตัวอย่าง และเปรียบเทียบกับแป้งข้าวโพด แป้งข้าวโพดข้าวเหนียว แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง และแป้งถั่วลิสง โดยตรวจวิเคราะห์อุณหภูมิของการเกิดเจลลาติโนเซชันด้วยเครื่อง DSC พบว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลาติโนเซชันของแป้งสาธูโดยเฉลี่ยอยู่ระหว่าง $69.4-70.1^{\circ}\text{C}$ ซึ่งอุณหภูมิการเกิดเจลลาติโนเซชันของแป้งสาธูจะมีค่าสูงกว่าแป้งข้าวโพด แป้งถั่วลิสง และแป้งมันฝรั่ง ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของการเกิดเจลลาติโนเซชันเท่ากับ 68, 63 และ 66°C ตามลำดับ โดยเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิของการเกิดเจลลาติโนเซชันและค่าเอนทัลปีของแป้งสาธูทั้ง 11 ตัวอย่าง พบว่าจะไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งอุณหภูมิการเกิดเจลลาติโนเซชันและค่าเอนทัลปีของแป้งแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเม็ดแป้ง ปริมาณของลักษณะโครงสร้างผลึกในเม็ดแป้ง ขนาดเม็ดแป้ง และสัดส่วนของโมเลกุลอะมิโลสและอะมิโลเพคติน

นอกจากนี้ Sriroth (1999) ตรวจวิเคราะห์ช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลาติโนเซชันและค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในกระบวนการเกิดเจลลาติโนเซชัน (Enthalpy, ΔH) ของแป้งสาธูโดยใช้เครื่อง DSC พบว่าแป้งสาธูจะมีอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลลาติโนเซชัน (Onset temperature, T_o) อยู่ระหว่าง $65-67^{\circ}\text{C}$ และค่าอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดการเกิดเจลลาติโนเซชัน (Peak temperature, T_p) อยู่ที่อุณหภูมิระหว่าง $72-73^{\circ}\text{C}$ ส่วนค่าเอนทัลปี (ΔH) มีค่าเท่ากับ 17-18 จูลต่อกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลังที่มีค่าอยู่ประมาณ 14 จูลต่อกรัม แสดงว่าแป้งสาธูต้องการพลังงานในการเปลี่ยนรูปเป็นแป้งเปียก (Paste) มากกว่าแป้งมันสำปะหลัง

Piyachomkwan และคณะ (1999) ศึกษาสมบัติของแป้งสาธูโดยวิเคราะห์กระบวนการเกิดเจลลาติโนเซชันของแป้งสาธูซึ่งสกัดมาจากลำต้นสาธูที่แบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ ลำต้นส่วนล่าง ลำต้นส่วนกลาง 2 ส่วน และลำต้นส่วนปลาย พบว่าค่าที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันโดยอุณหภูมิเริ่มต้นเกิดเจลลาติโนเซชัน (Onset temperature, T_o) อยู่ระหว่าง $63.50-68.34^{\circ}\text{C}$, อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดเจลลาติโนเซชัน (Peak temperature, T_p) อยู่ระหว่าง $71.98-73.40^{\circ}\text{C}$ และค่าเอนทัลปี (ΔH) ของแป้งสาธูเท่ากับ 16.25-19.55 จูลต่อกรัม

Maaruf และคณะ (2001) ศึกษาผลของปริมาณน้ำต่อการเกิดเจลลาติโนเซชันของแป้งสาธูด้วยเครื่อง DSC พบว่าเมื่อแป้งสาธูมีปริมาณน้ำมากกว่าร้อยละ 50 จะปรากฏฟีกเพียง 1 ฟีก

โดยอุณหภูมิสูงสุดของการเกิดเจลตาดีโนเซนชัน (T_p) อยู่ที่อุณหภูมิ 70.3°C แต่เมื่อให้ความร้อนกับแป้งสาธูเมื่อปริมาณน้ำลดลง (อัตราส่วนของแป้งต่อน้ำร้อยละ 37-50) ส่งผลให้พีคของอุณหภูมิสูงสุดของการเกิดเจลตาดีโนเซนชันเปลี่ยนแปลงโดยจะมีพีคเล็กๆ ปรากฏขึ้นมา ทำให้การวิเคราะห์แป้งสาธูด้วยเครื่อง DSC ปรากฏพีคขึ้นมา 2 พีค ทั้งนี้เนื่องจากเป็นผลของปริมาณน้ำในการหลอมหรือเปลี่ยนส่วนที่เป็นผลึกของแป้งสาธู โดยยังคงเหลือส่วนของผลึกหรือส่วนของอะมิโลเพคติน Ortega-Ojeda และ Eliasson (2001) ศึกษาการเกิดเจลตาดีโนเซนชันระหว่างแป้งผสม 2 ชนิด คือ แป้งมันฝรั่ง-แป้งข้าวโพดเหนียว แป้งมันฝรั่ง-แป้งข้าวบาร์เลย์ และแป้งข้าวโพดเหนียว-แป้งข้าวบาร์เลย์ พบว่าผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของแป้งผสมยกเว้นแป้งมันฝรั่ง-แป้งข้าวบาร์เลย์ จะปรากฏพีค 2 พีค ซึ่งจะเป็นลักษณะของแป้งแต่ละชนิดที่ผสมกัน กล่าวคือ การเกิดเจลตาดีโนเซนชันของแป้งไม่ขึ้นอยู่กับการผสมของแป้งที่แตกต่างกัน แต่ในกรณีของแป้งมันฝรั่ง-แป้งข้าวบาร์เลย์จะมีพีคเพียง 1 พีค ทั้งนี้เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของแต่ละแป้งที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน ทำให้เกิดการซ้อนทับกันระหว่างพีคของแป้งทั้ง 2 ชนิด แต่อย่างไรก็ตามการผสมแป้งจะมีผลทำให้ค่าอุณหภูมิสูงสุดของการเกิดเจลตาดีโนเซนชันสูงกว่าการเกิดเจลตาดีโนเซนชันของแป้งชนิดเดียว

3.5 การเกิดรีโทรเกรเดชัน

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลตาดีโนเซนชันแล้ว ถ้ามีการให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก จุดที่เม็ดแป้งถูกทำลายนี้จะทำให้ความหนืดลดลง โมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินกระจายออกมา และเมื่อปล่อยสารละลายแป้งให้เย็นตัวลง โมเลกุลที่อยู่ใกล้กัน โดยเฉพาะโมเลกุลอะมิโลสจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลได้เร็วกว่าอะมิโลเพคติน ทำให้เกิดเป็นร่างแหสามมิติโครงสร้างใหม่ (Recrystallization) ที่สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดซับน้ำเข้ามาอีก (Whistler and Bemiller, 1999) ทำให้แป้งมีความหนืดเพิ่มขึ้นและคงตัวมากขึ้นเกิดลักษณะเจลเหนียว ชุ่มและทึบแสง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) หรือการคืนตัว (Setback) (Atwell *et al.*, 1988) และเมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีก ลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกนอกเจล ซึ่งจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การแยกตัวของน้ำ (Syneresis) ซึ่งการคืนตัวของแป้งหากเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จะเกิดการตกตะกอน เมื่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลชุนและมีความหนืดเพิ่มขึ้น (Hermanson and Svegmarm, 1996) น้ำหนักโมเลกุล และลักษณะโครงสร้างของอะมิโลสมีความสำคัญต่อการคืนตัวของแป้ง แป้งที่มีโมเลกุลอะมิโลสเป็นองค์ประกอบสูงจะสามารถเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีโมเลกุลอะมิโลเพคตินเป็นองค์ประกอบสูง การตรวจสอบการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง

อาจจะประมาณได้จากค่าการคืนตัว ซึ่งเป็นค่าผลต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุด หรือความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด ซึ่งสามารถใช้เครื่อง Brabender หรือ Rapid visco analyzer (RVA) ในการวิเคราะห์ได้ นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบการเกิดรีโทรเกรเดชัน โดยนำแป้งที่ผ่านการเจลาติไนเซชันแล้วบ่มในสภาวะที่กำหนดเพื่อให้เกิดรีโทรเกรเดชันแล้วนำไปตรวจสอบด้วยเครื่อง DSC แล้วบันทึกค่าพลังงานที่ใช้ ($\Delta H_{\text{retrogradation}}$, ΔH_R) ซึ่งค่ารีโทรเกรเดชันของแป้งจะสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของเอนทัลปีของแป้งที่เกิดรีโทรเกรเดชันต่อค่าเอนทัลปีของแป้งที่ผ่านการเกิดเจลาติไนเซชัน (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)

Cui และ Oates (1997) ศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งสาकुที่ผ่านการเกิดเจลาติไนเซชันมาและเก็บที่อุณหภูมิ 5°C โดยนำตัวอย่างมาตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC พบว่าจะมีฟิสิกปรากฏขึ้น 2 ฟิสิก เป็นผลจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของทั้ง โมเลกุลอะมิโลสและอะมิโลเพกติน ทำให้เกิดเป็นร่างแหสามมิติโครงสร้างใหม่ขึ้น การเกิดรีโทรเกรเดชันของอะมิโลสจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 5°C ซึ่งมีผลทำให้อุณหภูมิสูงสุดของการเกิดเจลาติไนเซชัน (T_p) อยู่ที่ 145.2°C และค่าเอนทัลปีมีค่าเท่ากับ 1.7 จูลต่อกรัม การเกิดรีโทรเกรเดชันจะเพิ่มอย่างรวดเร็วขึ้นอยู่กับระยะเวลาของการเก็บ โดยค่าเอนทัลปีจะเพิ่มขึ้นเป็น 1.8 จูลต่อกรัม หลังจากเก็บไว้นาน 3 ชั่วโมง และจะเพิ่มสูงมากขึ้นเมื่อระยะเวลา 6 ชั่วโมง (ΔH_R 2.1 จูลต่อกรัม) จากการศึกษาการต้านทานของแป้งจะมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันอยู่ที่อุณหภูมิ 150°C ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ของ โมเลกุลอะมิโลส ระยะเวลาการเก็บเพิ่มมากขึ้นจะทำให้การเปลี่ยนแปลงของฟิสิกปรากฏที่อุณหภูมิระหว่าง 55-70°C ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลอะมิโลเพกติน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะไม่ปรากฏเมื่อเก็บไว้นาน 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 5°C หลังการเก็บนาน 6 ชั่วโมง จะปรากฏฟิสิกของอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันสูงสุด (T_p) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 58.4°C และมีค่าเอนทัลปีเท่ากับ 3.9 จูลต่อกรัม และเมื่อการเก็บนาน 12 ชั่วโมง 24 ชั่วโมง 2 วัน และ 5 วัน ค่าเอนทัลปีก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น (4.4, 5.1, 6.6 และ 6.8 จูลต่อกรัม ตามลำดับ) โดยการเปลี่ยนแปลงของฟิสิกเกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ของ โมเลกุลอะมิโลเพกติน และจะมีอุณหภูมิสูงสุดของการเกิดเจลาติไนเซชันอยู่ที่อุณหภูมิ 70.2°C ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกับแป้งดิบ กล่าวคือจะเกิดการจัดเรียงตัวเป็นร่างแหสามมิติโครงสร้างใหม่อย่างสมบูรณ์

Piyachomkwan และคณะ (1999) ตรวจวิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งสาकु พบว่าความสามารถในการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งสาकुมีค่าประมาณร้อยละ 30-50 ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนกันกับแป้งมันสำปะหลัง และจากการศึกษาของ Kumkanokrat (2001) รายงานว่าแป้งสาकुจะเกิดการแยกตัวของน้ำจากเจลต่ำกว่าแป้งถั่วเขียว ซึ่งส่งผลให้แป้งสาकुมีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งสูงกว่าแป้งถั่วเขียว กล่าวคือ แป้งสาकुจะมีความสามารถในการเกิดรีโทรเกรเดชัน

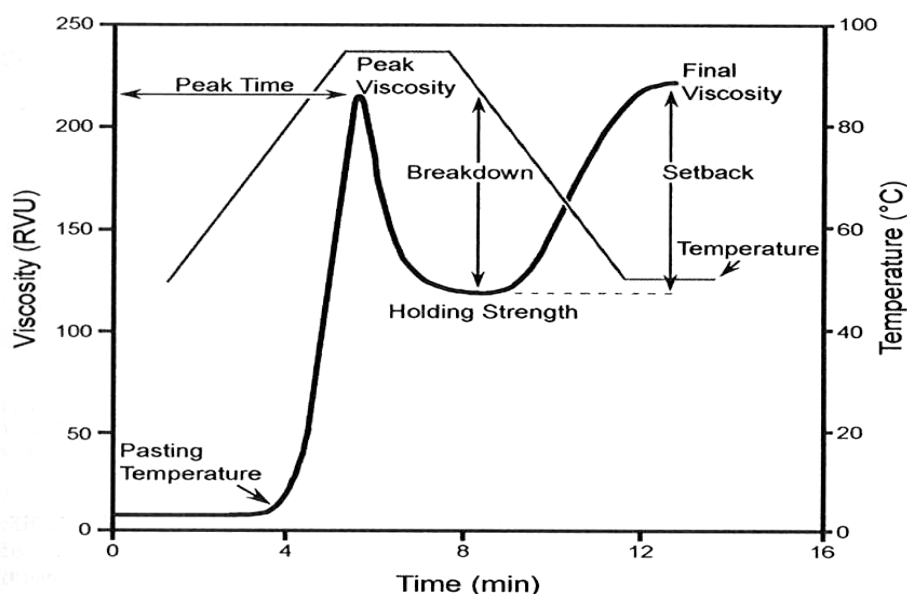
หรือการคืนตัวต่ำกว่าแป้งถั่วเขียว อะมิโลสเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความแข็งแรงเจลของแป้ง เนื่องจากอะมิโลสมีผลกระตุ้นหรือเร่งให้เกิดการจัดเรียงตัวกันและเกิดรีโทรเกรเดชัน รวมทั้งอะมิโลสสามารถจับตัวกับไขมันเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับไขมันและจับกับโมเลกุลอะมิโลเพคตินมีผลทำให้โครงข่ายของเจลมีความแข็งแรงมากขึ้น (Jane and Chen, 1992) กระบวนการเกิดรีโทรเกรเดชันจะเกิดขึ้นโดยโมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กระบายออกมา ทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลง จะทำให้โมเลกุลอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันเกิดการการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างใหม่ที่มีความเป็นระเบียบ ส่วนโมเลกุลของอะมิโลเพคตินจะเกิดในอัตราที่ช้ากว่า การรีโทรเกรเดชันมีผลกระทบต่อคุณภาพของลักษณะเนื้อสัมผัสและการยอมรับของผลิตภัณฑ์อาหารที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ ในกระบวนการผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยว และกระบวนการแปรรูปต่าง ๆ มีผลทำให้เกิดการรีโทรเกรเดชัน เช่น การทำแห้ง การทอด การอบ เป็นต้น ซึ่งการเกิดรีโทรเกรเดชันในผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวจะมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อสัมผัสกรอบ (Huang and Rooney, 2001)

ในการคืนตัวของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินและองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ในแป้ง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุลปิยะจอมขวัญ, 2543)

3.6 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง

ความหนืดเป็นสมบัติที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของแป้ง เมื่อแป้งได้รับความร้อน เม็ดแป้งจะดูดซับน้ำและเกิดการพองตัวขึ้นเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลถูกทำลาย ซึ่งการพองตัวของเม็ดแป้ง ทำให้น้ำบริเวณรอบๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งจึงเคลื่อนไหวได้ยาก มีผลให้เกิดความหนืดขึ้น (Zobel and Stephen, 1995) อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืด (Pasting temperature) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ เม็ดแป้งก็จะพองตัวมากขึ้น ความหนืดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนถึงจุดที่ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ซึ่งเป็นจุดที่บ่งบอกถึงเม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ และเมื่อให้ความร้อนต่อไปอีกรวมทั้งมีการกวนอย่างต่อเนื่อง เม็ดแป้งจะแตกตัวและโมเลกุลอะมิโลสกระจายออกมา ทำให้ความหนืดลดลง เมื่อมีการลดอุณหภูมิลง ทำให้เกิดการการจัดเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลอะมิโลส หรือการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Atwell *et al.*, 1988) ส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งเรียกว่า ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) จากภาพที่ 3 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง Rapid visco analyzer (RVA) ซึ่งจะสามารถตรวจสอบและติดตามการเปลี่ยนแปลงความหนืดในระหว่างการเกิดเจลในเซชัน

ของแป้ง โดยให้ความร้อนกับแป้งที่มีน้ำในปริมาณมากเกินพอในช่วงอุณหภูมิ 50-95^oซ และทำให้เย็นลงจาก 95 เป็น 50^oซ (Newport Scientific, 1995)



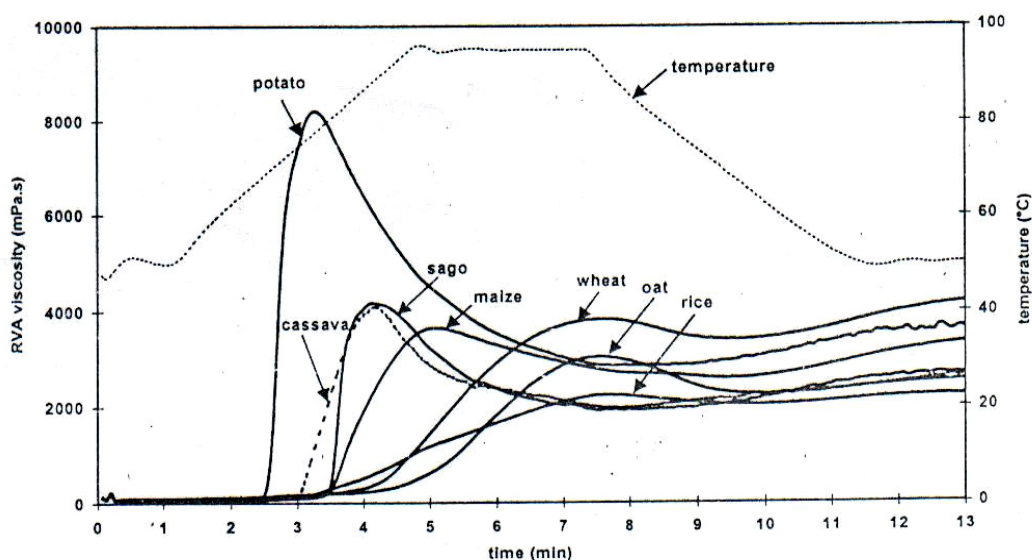
ภาพที่ 3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง Rapid visco analyzer (RVA)
Pasting characteristic of starch by Rapid visco analyzer (RVA)

ที่มา: Newport Scientific (1995)

Piyachomkwan และคณะ (1999) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่อง RVA ของแป้งสาकुที่ได้จากส่วนต่าง ๆ ของลำต้นสาकु ได้แก่ ส่วนล่างของลำต้น ส่วนกลางของลำต้น และส่วนปลายของลำต้น พบว่า แป้งสาकुมีการพองตัวอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับความร้อน ทำให้แป้งเปียกมีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากขนาดเม็ดแป้งและปริมาณที่เพิ่มขึ้นจากการพองตัวของเม็ดแป้งในน้ำ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางด้านความหนืดของแป้งสาकु จะเห็นได้ชัดเจนที่อุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 76-77^oซ ของทุกส่วนของจากลำต้นสาकु และค่าความหนืดสูงสุดมีค่าระหว่าง 340-373 RVU ซึ่งการกวนอย่างต่อเนื่องและความร้อนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เม็ดแป้งที่พองตัวเต็มที่แตกออกเป็นผลให้ความหนืดลดลง ซึ่งค่าความหนืดต่ำสุด (Trough viscosity) อยู่ระหว่าง 192-216 RVU และความแตกต่างของความหนืดสูงสุด และความหนืดต่ำสุด ที่เรียกว่า Breakdown มีค่าระหว่าง 142-163 RVU ซึ่งลักษณะความหนืดของแป้งสาकुจะเหมือนกับแป้งมันสำปะหลัง และเมื่อทำให้สารละลายของแป้งสาकुเย็นลง จะมีการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลเกิดขึ้น

ส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ซึ่งเรียกว่า ความหนืดสุดท้าย ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 254-303 RVU และความแตกต่างระหว่างค่าความหนืดต่ำสุดและความหนืดสุดท้ายหรือค่า Setback ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเกิดรีโทรเกรเดชัน ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 62-93 RVU

Sriburi (1999) ตรวจวิเคราะห์ความหนืดของแป้งชนิดต่างๆ ด้วยเครื่อง RVA และสามารถแยกกลุ่มตามลักษณะของความหนืดได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มของแป้งจากธัญพืช (แป้งข้าวโพด, แป้งข้าวสาลี, แป้งข้าวโอ๊ตและแป้งข้าวเจ้า) และกลุ่มของแป้งจากหัว แป้งจากรากและแป้งจากส่วนของลำต้น (แป้งมันฝรั่ง, แป้งมันสำปะหลังและแป้งสากุ) จากการศึกษาพบว่าแป้งมันฝรั่งจะมีลักษณะพฤติกรรมความหนืดเด่นชัด เนื่องจากการมีหมู่ฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบมากเป็นผลให้แป้งมันฝรั่งมีความหนืดสูงสุดสูง (ภาพที่ 4) แป้งมันฝรั่งจะเกิดเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและเกิดการพองตัวไม่จำกัดที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากแป้งจากพืชตระกูลหัวมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลต่ำ ทำให้เกิดการเจลาติไนเซชันได้ง่ายและให้ความหนืดสูง แต่ความหนืดจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับแรงเฉือน แสดงถึงแป้งมันฝรั่งแตกตัวได้ง่ายจึงไม่ทนต่อแรงกวน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลังและแป้งสากุจะมีลักษณะเริ่มต้นของการพองตัวคล้ายกับอุณหภูมิของแป้งจากมันฝรั่ง แต่หลังจากนั้นการพองตัวเริ่มมีอัตราลดลงอย่างมาก



ภาพที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งชนิดต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA

Changes in RVA profiles of native starches

ที่มา: Sriburi (1999)

Srichuwong และคณะ (2005) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาธู (น้ำแป้งร้อยละ 8) พบว่าแป้งมันสำปะหลังมีอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดอยู่ที่อุณหภูมิ 67.4 °C ค่าความหนืดสูงสุดเท่ากับ 188.1 RVU ค่า Breakdown เท่ากับ 121.8 RVU ความหนืดสุดท้ายเท่ากับ 113.3 RVU และค่าการคืนตัวมีค่าเท่ากับ 47.0 RVU ขณะที่อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดของแป้งสาธูอยู่ที่ 72.8 °C ความหนืดสูงสุดเท่ากับ 203.9 RVU ค่า Breakdown เท่ากับ 127.7 RVU ความหนืดสุดท้ายเท่ากับ 137.4 RVU และค่าการคืนตัวมีค่าเท่ากับ 61.2 RVU

4. ข้าวเกรียบ

ข้าวเกรียบ (Cracker) จัดเป็นอาหารขบเคี้ยว (Snack food) ประเภทหนึ่งที่นิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลายในประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ รวมทั้งประเทศไทย ซึ่งจะมีชื่อแตกต่างกันไป เช่น ในประเทศมาเลเซีย จะเรียกว่า Keropok และประเทศอินโดนีเซีย เรียกว่า Krapuk ในประเทศทางตะวันตก ข้าวเกรียบจะจัดอยู่ในพวกผลิตภัณฑ์กึ่งแห้ง หรือผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป (Lachmann, 1969) ซึ่งก่อนบริโภคจะต้องนำไปอบหรือทอดในน้ำมันร้อน ทำให้อาหารขบเคี้ยวสามารถพองตัวได้ และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะรูพรุน กรอบ และความหนาแน่นต่ำ (Martz, 1984)

ข้าวเกรียบ หมายถึงผลิตภัณฑ์ที่ทำจากแป้งเป็นส่วนประกอบหลัก เช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งสาลี แป้งมันสำปะหลัง ผสมด้วยเนื้อสัตว์หรือผัก เครื่องปรุงรส บดผสมให้เข้ากัน ทำให้สุกแล้วทำเป็นรูปร่างต่างๆ ทำให้แห้ง นำไปทอดหรืออบก่อนรับประทาน (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2530)

ข้าวเกรียบสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. ข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป หมายถึงข้าวเกรียบที่ยังไม่ได้ทอดหรืออบ มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 12
2. ข้าวเกรียบสำเร็จรูป หมายถึงข้าวเกรียบที่ทอดหรืออบแล้วพร้อมที่จะรับประทานได้ มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 3

4.1 กระบวนการผลิตข้าวเกรียบ

ข้าวเกรียบเป็นผลิตภัณฑ์ที่อาศัยหลักการพื้นฐานในการทำให้เกิดเจลาตินในเซชันของแป้ง ซึ่งส่วนประกอบที่สำคัญในการผลิตข้าวเกรียบ คือ แป้งและน้ำ ในกระบวนการผลิตข้าวเกรียบจะอาศัยการผลิตเป็นก้อนโด โดยผสมแป้งมันสำปะหลัง/แป้งสาธูกับน้ำ และส่วนผสมอื่นๆ

เช่น เนื้อปลา กุ้ง น้ตาล และผงชูรส นวดผสมให้เข้ากัน ปั่นก้อนโคเป็นรูปทรงกระบอก แล้วทำให้สุกด้วยการนึ่งหรือต้ม ทำให้เย็น ตัดเป็นชิ้นบางๆ ทำแห้ง บรรจุใส่ถุง โดยก่อนบริโภคนำแผ่นข้าวเกรียบหลังอบแห้ง ไปทอดในน้ำมันร้อน ทำให้เกิดการพองตัว มีลักษณะรูพรุนและผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความหนาแน่นต่ำ ซึ่งอัตราการพองตัวหลังจากทอดจะเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบ (Siaw *et al.*, 1985; Yu, 1991a; Yu *et al.*, 1981; Yu and Low, 1992; Yu and Tan, 1990)

4.2 คุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบ

คุณภาพที่สำคัญของข้าวเกรียบคือ การพองตัว และความกรอบของผลิตภัณฑ์หลังทอดแล้ว ซึ่งลักษณะต่างๆ นี้จะขึ้นอยู่กับส่วนผสมและวิธีการผลิต อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบจะสัมพันธ์กับความกรอบ ซึ่งความกรอบจะเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดคุณภาพของข้าวเกรียบและการยอมรับในผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบ (Yu, 1991a) ชนิดของแป้งที่ใช้จะมีอิทธิพลต่อการพองตัวของข้าวเกรียบ ข้าวเกรียบที่มีอัตราการพองตัวสูงกว่าร้อยละ 77 จะมีความกรอบที่ดีเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ส่วนข้าวเกรียบที่คุณภาพไม่ดี คือ ข้าวเกรียบที่ไม่พองตัว มีสีคล้ำ ขนาดและรูปร่างไม่แน่นอน (Siaw *et al.*, 1985)

การพองตัวของผลิตภัณฑ์ที่สำเร็จรูปเกิดขึ้นเนื่องจากการระเหยไอน้ำอย่างรวดเร็วภายในส่วนออสถฐานของโครงสร้างโมเลกุลแป้ง (Colonna *et al.*, 1989) เมื่อผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนสูง โดยอาศัยการสร้างไอน้ำและทำให้ก๊าซขยายตัวภายในก้อนแป้งสุก ไอน้ำและอากาศจะถูกกักเก็บอยู่ภายในจนเกิดแรงดันที่สูงมาก เมื่อแผ่นแป้งอ่อนตัวลง ไอน้ำจะระเหยออกไปอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการขยายตัวและเหลือเป็น โครงสร้างที่มีรูพรุนไว้ การที่ข้าวเกรียบจะพองตัวได้ดีจะขึ้นกับ การเกิดไอน้ำและการขยายตัวของก๊าซจะต้องเกิดขึ้นก่อนการอ่อนตัว โดยมีช่วงระยะเวลาที่เหมาะสม กล่าวคือ ไอน้ำและการขยายตัวของก๊าซที่เกิดขึ้นจะต้องมีแรงดันสูงมากพอ ก่อนที่แป้งจะอ่อนตัวลง การพองตัวจะเกิดขึ้นมาก การเกิดไอน้ำช้าเกินไป เช่น ใช้อุณหภูมิต่ำเกินไป ไอน้ำจะเกิดขึ้นก่อนการอ่อนตัวมาก ไอน้ำส่วนหนึ่งจึงหนีออกไปก่อน แรงดันที่เหลืออยู่จึงไม่มากนัก การพองตัวของข้าวเกรียบจึงมีน้อยลง หรือ การเกิดไอน้ำจะต้องรวดเร็วพอจนกระทั่งมีแรงดันมากพอก่อนการอ่อนตัวของแป้ง (พรรณี วงศ์ไกรศรีทอง, 2530)

ความกรอบของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบเป็นปัจจัยสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้ความกรอบเป็นผลจากการระเหยเป็นไอของน้ำ ทำให้เกิดแรงดันไอน้ำภายในเม็ดแป้งดันให้เม็ดแป้งเกิดการขยายตัวออกในระหว่างการทอด ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบเกิดเป็นโพรงอากาศหรือรูพรุน ซึ่งลักษณะดังกล่าวทำให้ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบเกิดความกรอบขึ้น อัตราการพอง

ตัวจะมีความสัมพันธ์กับลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความกรอบของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบ (Yu, 1991b) โดยแป้งที่ผ่านการเกิดเจลลาติโนเซชันอย่างสมบูรณ์มีผลทำให้เกิดโครงสร้างที่ขยายออกมีความคงตัวดี ส่งผลให้เกิดความกรอบในผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบ (Yu *et al.*, 1981) ซึ่งการสูญเสียคุณภาพความกรอบของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบจะทำให้ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (Yu, 1991a)

4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบ

4.3.1 ชนิดของแป้ง

แป้งเป็นวัตถุดิบหลักที่สำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบ การผสมแป้งลงในผลิตภัณฑ์จะช่วยให้ข้าวเกรียบเกิดการพองตัวและกรอบเมื่อทอด (Radley, 1976) ซึ่งแป้งแต่ละชนิดจะให้คุณสมบัติที่มีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัส ความหนืด ความคงตัวและการพองตัว โดยองค์ประกอบสำคัญของแป้งที่มีผลต่อการพองตัวของข้าวเกรียบคือ อะมิโลสและอะมิโลเพคติน ซึ่งลักษณะเนื้อสัมผัสและการพองตัวของผลิตภัณฑ์สุดท้ายจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินในเมล็ดแป้ง กล่าวคือ หากมีปริมาณอะมิโลเพคตินสูง จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีการพองตัวดี ความหนาแน่นต่ำหรือน้ำหนักเบา แต่เปราะง่าย (เพลินใจ ดังคณะกุล, 2546) ส่วนอะมิโลสจะช่วยลดปัญหาการแตกหักของผลิตภัณฑ์ โดยแป้งที่มีปริมาณอะมิโลเพคตินร้อยละ 50 หรือมากกว่า และมีปริมาณอะมิโลสอยู่ร้อยละ 5-20 จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี (Feldberg, 1969) แป้งแต่ละชนิดจะมีผลต่อลักษณะของแป้งสุก อุณหภูมิที่ทำให้แป้งสุก ลักษณะของเนื้อสัมผัสด้านความเหนียว การพองตัว ความกรอบ ที่แตกต่างกัน เนื่องจากเมล็ดแป้งแต่ละชนิดประกอบด้วยอะมิโลสและอะมิโลเพคตินในสัดส่วนที่ต่างกัน (Huang and Rooney, 2001) (ตารางที่ 1)

แป้งสุกที่ประกอบด้วยอะมิโลสสูงจะมีลักษณะแข็ง ส่วนแป้งที่มีอะมิโลเพคตินสูงจะให้ลักษณะที่เหนียว ยืดหยุ่นสูง (เพลินใจ ดังคณะกุล, 2546) ชนิดของแป้งที่เหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบให้มีการพองตัวดี โดยแป้งภายหลังการเกิดเจลลาติโนเซชันจะต้องได้เจลที่มีลักษณะใส คงตัวต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน มีความต้านทานต่อแรงเฉือนต่ำ และเมื่อทำให้เย็นแป้งจะมีความหนืดสูง ซึ่งแป้งที่มีอะมิโลเพคตินสูงเจลที่ได้จะใส ให้ความหนืดมากกว่าด้านทานต่อแรงเฉือนต่ำและมีความคงตัวต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน ส่วนอะมิโลสมีแนวโน้มทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างโมเลกุลของแป้งด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้ได้ เจลแข็งเมื่อวางทิ้งไว้ให้เย็น ส่งผลให้แป้งมีความต้านทานต่อแรงเฉือนมากกว่า (Mohamed *et al.*, 1988)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของแป้งแต่ละชนิด
General property of each starch

Starch type	Amylose (%)	Amylopectin (%)	Gelatinization temperature (°C)	Paste clarity
Corn	28	72	62-80	Opaque
Waxy corn	1	99	63-74	Clear
Potato	21	79	58-65	Clear
Wheat	25	75	53-72	Slightly opaque
Sorghum	26	74	68-78	-
Rice	17	83	61-80	Slightly opaque
Cassava/Tapioca	17	83	52-65	Clear-translucent
Sago	27	73	60-74	Clear-translucent

ที่มา: Pomeranz (1991) และ Whistler and Bemiller (1999)

ปราณีศา เชื้อโพธิ์หัก และคณะ (2541) รายงานว่า ความกรอบของข้าวเกรียบที่ผลิตโดยใช้แป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียวภายหลังทอดความกรอบจะคงตัวไม่นาน จึงศึกษาการใช้แป้งข้าวสาลีทดแทนแป้งมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยเก็บรักษาของข้าวเกรียบกึ่งหลังทอดเป็นเวลา 12 วัน พบว่าข้าวเกรียบที่มีแป้งข้าวสาลีทดแทนแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้นร้อยละ 15 มีระดับคะแนนความชอบเฉลี่ยสูงกว่าข้าวเกรียบอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และมีการพองตัวสูง ซึ่งการใช้แป้งข้าวสาลีในปริมาณเพิ่มขึ้นมีผลให้อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบลดลง เนื่องจากแป้งข้าวสาลีมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบเพิ่มสูงขึ้นด้วย โปรตีนจะไปจับกับโมเลกุลของแป้งทำให้แป้งไม่สามารถขยายตัวได้ และจากการศึกษาของพรณีวงศ์ไกรศรีทอง (2530) พบว่าชนิดของแป้งมีผลต่อลักษณะความกรอบและการพองตัว การเติมแป้งข้าวเจ้าผสมกับแป้งมันสำปะหลังทำให้ข้าวเกรียบมีการพองตัวลดลงและผลิตภัณฑ์จะมีลักษณะกรอบแข็งมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากแป้งข้าวเจ้ามีอะมิโลสสูงและเมื่อประเมินคะแนนความชอบของความกรอบของข้าวเกรียบที่มีการผสมแป้งข้าวเจ้าจะมีคะแนนด้านความกรอบสูงกว่าข้าวเกรียบที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว

เพลินใจ ดังคณะกุล (2546) รายงานว่าข้าวเกรียบที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว จะมีความหนาแน่นต่ำที่สุด นั่นคือ การพองตัวดีที่สุด ลักษณะกรอบและเบาแต่จะกรอบ

ไม่นาน การผสมแป้งข้าวเจ้าหรือแป้งสาลีทดแทนแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 จะทำให้ก้อนแป้งหลังนึ่งคงรูปทรงกระบอก เมื่อนำไปทอดจะมีรูพรุนขนาดเล็ก เนื้อแน่น การพองตัวจะลดลง แต่ความกรอบอยู่ได้นาน และจากการศึกษาของ Mohamed และคณะ (1988) รายงานว่าการพองตัวมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับความกรอบแข็งของข้าวเกรียบ โดยข้าวเกรียบที่มีอัตราการพองตัวสูงมีผลให้โมเลกุลของแป้งที่ล้อมรอบช่องโปร่งอากาศมีความหนาแน่นน้อย ทำให้ข้าวเกรียบแตกได้ง่าย

Yu (1991a) ศึกษาผลการยอมรับของข้าวเกรียบปลาที่ผลิตจากแป้งต่างชนิดกัน คือ แป้งมันสำปะหลัง แป้งสาธู และแป้งข้าวสาลี พบว่าอัตราการพองตัวของข้าวเกรียบที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาธูจะมีค่าสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของโปรตีนมีผลต่อลดสมบัติการขยายตัวของข้าวเกรียบ อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาธูจะสูงกว่าร้อยละ 77 ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบมีความกรอบที่ดีเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (Siaw *et al.*, 1985) และผลการประเมินทางด้านประสาทสัมผัส พบว่าข้าวเกรียบที่ผลิตด้วยแป้งมันสำปะหลังมีคะแนนความชอบทางด้านสี ความกรอบ กลิ่นรส และความชอบรวมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวเกรียบที่ผลิตจากแป้งสาธู

Kyaw และคณะ (2001a) ศึกษาความแข็งแรงของโคข้าวเกรียบปลาที่ผ่านการนึ่งที่อุณหภูมิ 100-121°C พบว่า ข้าวเกรียบปลาที่ผลิตจากแป้งข้าวสาลีมีค่าแรงกด (Compressive strength) เพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนข้าวเกรียบปลาจากแป้งมันสำปะหลังจะมีค่าแรงกดลดลง ทั้งนี้เนื่องจากแป้งข้าวสาลีมีปริมาณอะมิโลสอยู่ร้อยละ 25 ซึ่งมากกว่าแป้งมันสำปะหลังที่มีอะมิโลสอยู่ร้อยละ 17 ส่งผลให้แป้งสาลีที่ผ่านการทำให้สุกเจลจะมีลักษณะแข็งกว่าแป้งมันสำปะหลัง พรรณี วงศ์ไกรศรีทอง (2530) พบว่าการยืดตัวของเจลขึ้นอยู่กับการแตกตัวของเม็ดแป้งและปริมาณอะมิโลส เม็ดแป้งที่มีอะมิโลสสูงจะแตกตัวได้ยาก แต่ถ้าสามารถทำให้แตกตัวได้จะให้เจลที่เหนียวหนืด เมื่อนำไปทำข้าวเกรียบจะพองตัวได้ยาก ได้ข้าวเกรียบที่แข็งเหนียว แต่ถ้าเม็ดแป้งไม่แตกตัวมากจะได้ข้าวเกรียบที่แข็งกรอบและรักษาความกรอบได้นาน ส่วนเม็ดแป้งที่มีอะมิโลสต่ำหรือมีอะมิโลสเพคตินสูง การแตกตัวจะเกิดขึ้นได้ง่าย เจลที่ได้จะเหนียวหนะและยืดออกได้ดี เมื่อนำไปทำข้าวเกรียบจะพองตัวออกได้ง่าย แต่เก็บได้ไม่นานเมื่อสัมผัสกับอากาศจะอ่อนตัว ไม่กรอบ

4.3.2 ปริมาณน้ำ

น้ำจะเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ของข้าวเกรียบ โดยโมเลกุลของน้ำจะเป็นตัวช่วยในการเกิดเจลตาในเซชันของแป้งได้โดยสมบูรณ์ในระหว่างการนึ่ง (Kyaw *et al.*, 2001b) ซึ่งปริมาณน้ำที่ใช้มีผลต่อการพองและแตกตัวของเม็ดแป้งมาก ถ้าใช้น้ำมากเกินไปเม็ดแป้งจะแตกตัวมากให้เจลที่เหนียว (Gutcho, 1973) ในทางตรงกันข้ามถ้าใช้น้ำน้อย

เกินไปแป็งจะพองตัวน้อยและไม่สุก จะไม่เกิดเจลมากนัก ก้อนโคที่ไต้หวัน กรอบ เมื่อทอดจะไม่พองตัว Mohamed และคณะ (1988) รายงานว่าปริมาณน้ำมีผลต่อการพองตัวและความกรอบของข้าวเกรียบ ปริมาณน้ำที่น้อยมีผลให้การเกิดเจลาคติในเซชันของแป็งไม่สมบูรณ์ในระหว่างการนึ่งด้วยไอน้ำและข้าวเกรียบพองตัวได้ไม่ดี แต่หากใช้ปริมาณน้ำมากเกินไปอัตราการพองตัวของข้าวเกรียบจะลดลงเช่นกัน เนื่องจากจะไปลดปริมาณของแข็งในแผ่นของข้าวเกรียบ หลังจากทำให้แห้งแผ่นข้าวเกรียบจะบางลง และปริมาณน้ำที่มากเกินไปมีผลให้ก้อนโคอ่อนตัวและยากในการหั่นเป็นแผ่นบาง ซึ่งการทำให้แป็งสุกในปริมาณน้ำที่มากเกินไปจะมีผลเหนียวน้ำให้แป็งสามารถเกิดเจลาคติในเซชันได้ โดยปริมาณน้ำที่ทำให้แป็งเกิดเจลาคติในเซชันได้อย่างสมบูรณ์จะต้องมีปริมาณน้ำอยู่อย่างน้อยร้อยละ 61 และเป็นส่วนของแป็งร้อยละ 39 ซึ่งหากปริมาณน้ำน้อยกว่าร้อยละ 61 จะทำให้แป็งไม่สามารถเกิดการเจลาคติในเซชันได้อย่างสมบูรณ์ (Wang *et al.*, 1991)

4.3.3 อุณหภูมิและระยะเวลาในนึ่ง

ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบมีแป็งเป็นองค์ประกอบหลัก ในการผลิตข้าวเกรียบจะอาศัยหลักการพื้นฐานของกระบวนการเกิดเจลาคติในเซชันของเม็ดแป็ง ซึ่งต้องให้เกิดอย่างสมบูรณ์จึงจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ดี จากการทดลองของเพลินใจ ตั้งคณะกุล (2546) พบว่าการนึ่งก้อนโคที่ผลิตจากแป็งมันสำปะหลังด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100^oซ เป็นเวลา 30-45 นาที ก็เพียงพอที่จะทำให้เม็ดแป็งสุกได้

Kyaw และคณะ (2001a) ศึกษาผลของอุณหภูมิการนึ่งต่อการพองตัวของข้าวเกรียบปลาที่ผลิตจากแป็งมันสำปะหลังและแป็งข้าวสาลีที่อัตราส่วนของแป็งต่อปลา 1:1 และปริมาณน้ำร้อยละ 30 นึ่งด้วยแรงดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 100, 108, 115 และ 121^oซ เป็นระยะเวลา 30 นาที เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 5^oซ นาน 18 ชั่วโมง หั่นเป็นแผ่นหนา 3 มิลลิเมตร อบแห้งที่อุณหภูมิ 40-45^oซ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำไปทอดในน้ำมันที่อุณหภูมิ 200^oซ นาน 15 วินาที แล้ววัดอัตราการพองตัวของข้าวเกรียบหลังทอด พบว่าอัตราการพองตัวของข้าวเกรียบปลาที่ผลิตจากแป็งสาลีจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของการนึ่งสูงขึ้น แต่ข้าวเกรียบปลาที่ผลิตจากแป็งมันสำปะหลังจะมีอัตราการพองตัวลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการนึ่งให้สูงขึ้นกว่า 100^oซ ซึ่งความสามารถในการจับกับน้ำของแป็งสาลีในก้อนโคของข้าวเกรียบจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของการนึ่งเพิ่มขึ้น โดยโมเลกุลส่วนใหญ่ของเม็ดแป็งยังไม่มีแตกตัวจนกระทั่งอุณหภูมิสูงถึง 121^oซ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิการนึ่งสูงขึ้น โมเลกุลของเม็ดแป็งมีความสามารถในการจับกับน้ำเพิ่มขึ้นและเกิดการพองตัวได้ดีเมื่ออุณหภูมิการนึ่งสูงถึง 121^oซ ทั้งนี้เป็นเนื่องจากแป็งข้าวสาลีจะมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 11.51 ซึ่งมีผลทำให้โปรตีนและแป็งเกิดอันตรกิริยากันได้ (Oikku and Chokyun, 1978) โดยจะส่งผลให้โครงสร้างของเม็ดแป็งมีความแข็งแรงและต้านทานต่อการแตกตัว (Dahle, 1971) ในขณะที่แป็งมันสำปะหลังมีปริมาณโปรตีนอยู่น้อยกว่าร้อยละ 1 (Defloor *et al.*, 1998) เม็ดแป็งจึงเกิดการ

แตกตัวตั้งแต่อุณหภูมิ 108°C ขึ้นไป ทำให้น้ำถูกปล่อยออกมาและเกิดการหลอมละลาย (อ่อนตัว) ของโครงสร้างโปรตีนปลาและแป้ง เมื่อนำไปทอดข้าวเกรียบปลาจากแป้งมันสำปะหลังจะมีการพองตัวลดลง ทั้งนี้เนื่องจากแรงดันจากการระเหยเป็นไอของน้ำลดลง และปริมาณของอะมิโลสในแป้งสาลี (ร้อยละ 25) สูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง (ร้อยละ 17) อาจจะเป็นผลต้องใช้อุณหภูมิในการนึ่งมากขึ้นเพื่อให้อัตราการพองตัวเพิ่มขึ้น

Kyaw และคณะ (1999) ศึกษาผลของระยะเวลาหนึ่งต่ออัตราการพองตัวของข้าวเกรียบปลาที่มีปริมาณของปลาต่อแป้งเป็นอัตราส่วน 1 ต่อ 1, เกลือร้อยละ 2, น้ำตาลร้อยละ 1 โมโนโซเดียมกลูตาเมตร้อยละ 0.1 และน้ำร้อยละ 30 ของน้ำหนักทั้งหมดของแป้งและปลาเป็นองค์ประกอบ และระยะเวลาในการนึ่ง 15, 20, 30, 50, 70 และ 90 นาที พบว่าอัตราการพองตัวของข้าวเกรียบปลาจะมีค่าสูงที่ระยะเวลานึ่งนาน 20-30 นาที แต่เมื่อให้ระยะเวลานึ่งนานกว่า 30 นาที เป็นผลให้ข้าวเกรียบปลามีอัตราการพองตัวลดลง เนื่องจากการให้ความร้อนเป็นระยะเวลานาน มีผลให้เม็ดแป้งที่พองตัวเต็มที่มีการแตกตัวออกมากขึ้น ซึ่งการแตกตัวของเม็ดแป้งเกิดจากการแยกออกจากกันของโครงสร้างร่างแหของอะมิโลส ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของน้ำถูกปลดปล่อยออกจากโครงสร้างของเม็ดแป้ง เมื่อนำไปทอดแรงดันที่เกิดขึ้นจากการระเหยเป็นไอของน้ำในโครงสร้างของเม็ดแป้งอ่อนลง จึงส่งผลให้ข้าวเกรียบมีอัตราการพองตัวน้อยลง ซึ่งการนึ่งก่อนโคของข้าวเกรียบในระยะเวลาที่สามารถทำให้เม็ดแป้งเกิดการเจลาติไนเซชันได้อย่างสมบูรณ์ และเม็ดแป้งพองตัวเต็มที่โดยที่ยังไม่แตกตัวออก จะมีผลให้อัตราการพองตัวของข้าวเกรียบมีค่าสูง

4.3.4 การทำแห้ง

การอบแห้งเป็นขั้นตอนที่มีจุดประสงค์เพื่อระเหยน้ำออกหรือการลดความชื้นของแผ่นโคข้าวเกรียบ ซึ่งความชื้นมีความสำคัญต่อการพองตัวของข้าวเกรียบ ความร้อนจากน้ำมันจะทำให้ น้ำในก้อนโคกลายเป็นไอเกิดความดันไอน้ำให้เนื้อของข้าวเกรียบขยายตัวเป็นโพรง หรือรูพรุน (เพลินใจ ดังคณะกุล, 2546) ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมต่อการพองตัวที่ดีของข้าวเกรียบควรอยู่ระหว่างร้อยละ 6-12 (Gutcho, 1973) อย่างไรก็ตามถ้าข้าวเกรียบมีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 7-8 จะส่งผลให้แผ่นข้าวเกรียบแตก แต่ถ้าข้าวเกรียบมีความชื้นสูงเกินไป เมื่อนำไปทอดจะเกิดรูพรุนขนาดใหญ่บ้างเล็กบ้างไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นลักษณะของข้าวเกรียบที่คุณภาพต่ำ (เพลินใจ ดังคณะกุล, 2546) ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบของไทยจะกำหนดให้มีความชื้นในผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบที่สำเร็จรูปได้ไม่เกินร้อยละ 12 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2530) จากการศึกษาของ ดวงใจ ทิระบาล และนางนุช รักสกุลไทย (2533) รายงานว่า ระยะเวลาการอบแห้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเกรียบปลา โดยเมื่อกำหนดอัตราส่วนของแป้งต่อปลาเท่ากับ 65:35 และผ่านการนึ่งด้วยไอน้ำเป็นเวลานาน 60 นาที แล้วอบแห้งข้าวเกรียบปลาเป็นระยะเวลา 120, 150, 180, 210

และ 240 นาที ที่อุณหภูมิ 50-65°C พบว่าระยะเวลาการอบนานขึ้นส่งผลให้ข้าวเกรียบมีความชื้นลดลง ข้าวเกรียบที่ใช้เวลาอบ 180 นาที มีความชื้นเท่ากับร้อยละ 12 และได้คะแนนการยอมรับสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.3.5 การทอด

การทอดเป็นกระบวนการที่ทำให้ข้าวเกรียบพองตัวโดยใช้น้ำมันเป็นสื่อความร้อน ซึ่งเมื่อแผ่นข้าวเกรียบได้รับความร้อนจากน้ำมันในระหว่างการทอด จะทำให้น้ำที่แทรกอยู่ในก้อนโดระเหยกลายเป็นไอขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดความดันไอน้ำขึ้นภายในดันให้เนื้อของข้าวเกรียบขยายตัวได้เกิดลักษณะเป็นโพรง หรือรูพรุน ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความกรอบ และความชื้นของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง ขณะเดียวกันผลิตภัณฑ์จะดูดซับน้ำมันเข้าไปแทนที่น้ำที่ระเหยออก และแทรกอยู่ในช่องว่างหรือโพรงอากาศภายในผลิตภัณฑ์ทำให้มีปริมาณน้ำมันเพิ่มขึ้น (Korkida *et al.*, 2000; Moreira *et al.*, 1997) ซึ่งสภาวะการทอดที่ทำให้แผ่นมันสำปะหลังมีการพองตัวสูงสุด คือ อุณหภูมิของการทอดอยู่ที่อุณหภูมิ 200°C นานเป็นเวลา 40 วินาที เมื่อความชื้นของแผ่นมันสำปะหลังเริ่มต้นอยู่ที่ร้อยละ 15 (Nair *et al.*, 1996)

4.3.6 ส่วนประกอบอื่นๆ

เนื้อสัตว์ที่นิยมเติมในข้าวเกรียบได้แก่ กุ้ง ปลา หมึก โดยจะเป็นแหล่งโปรตีนและทำให้เกิดกลิ่นรสเฉพาะของข้าวเกรียบตามชนิดของเนื้อสัตว์ที่ใช้ ซึ่งในเนื้อสัตว์จะมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบช่วยให้คุณภาพของข้าวเกรียบดีขึ้น เช่น ไมโอซิน เป็นโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของกล้ามเนื้อ เป็นโมเลกุลที่มีโซ่ยาวเป็นตัวอุ้มน้ำและทำให้เกิดร่างแหเล็กๆ จำนวนมาก ร่างแหดังกล่าว ทำให้เกิดความเหนียวขึ้น แต่เมื่อปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นการขยายตัวของข้าวเกรียบจะลดลง เนื่องจากโปรตีนจะเกิดอันตรกิริยากับเม็ดแป้งส่งผลให้ความกรอบของข้าวเกรียบลดลง (Yu, 1991a) นอกจากนี้ยังมีส่วนของเครื่องปรุงรส เช่น เกลือ น้ำตาล โมโนโซเดียมกลูตาเมต ซึ่งการเติมส่วนผสมเหล่านี้ลงในส่วนผสมของแป้ง จะสามารถไปแข่งจับกับน้ำ ซึ่งมีผลทำให้อุณหภูมิของการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งสูงขึ้น (Cheow and Yu, 1997)

Kyaw และคณะ (2001b) ศึกษาผลของปริมาณเนื้อปลาที่ร้อยละ 0, 10, 15, 30 และ 50 ที่มีผลต่อการระดัดการเกิดเจลลิตีในเซชันในข้าวเกรียบปลา พบว่าเม็ดแป้งตรงกึ่งกลางก้อนโดของข้าวเกรียบที่มีปริมาณเนื้อปลาร้อยละ 0 และ 10 ภายหลังหนึ่งเป็นระยะเวลา 100 นาที เกิดการเจลลิตีในเซชันได้ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากในระหว่างการนึ่ง โมเลกุลของน้ำเกิดการเคลื่อนย้ายออกจากส่วนตรงกลางออกสู่ด้านนอกของก้อนโดข้าวเกรียบ ในขณะที่ส่วนตรงกลางที่ไม่สามารถเกิดเจลลิตีในเซชันได้ เนื่องจากมีการสูญเสียความชื้นจากส่วนด้านนอก ทำให้ไม่มีน้ำเพียงพอที่จะใช้ในการเกิดเจลลิตีในเซชัน จากการศึกษาเม็ดแป้งในก้อนโดของข้าวเกรียบจะเกิดเจลลิตีในเซชันได้

อย่างสมบูรณ์เมื่อมีปริมาณของเนื้อปลาอยู่ร้อยละ 15 และปริมาณแป้งร้อยละ 85 ในระยะเวลาหนึ่งเพียง 30 นาที ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณของเนื้อปลาดังแต่ร้อยละ 15 ขึ้นไป มีผลทำให้โครงสร้างร่างแหของโปรตีนจากเนื้อปลาเริ่มพัฒนาขึ้น และส่งผลให้ความสามารถในการอุ้มน้ำของก้อนโดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยโปรตีนจากเนื้อปลาจะช่วยยึดจับโมเลกุลของน้ำในก้อนโดข้าวเกรียบไว้ภายในโครงสร้างร่างแหของเจลโปรตีนจากเนื้อปลา ทำให้กำจัดการเคลื่อนย้ายและลดการสูญเสียของโมเลกุลน้ำในระหว่างการนี้ ทำให้มีน้ำเพียงพอที่จะช่วยให้แป้งเกิดเจลตาติในเซชันได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของระบบที่มีโปรตีน แป้งและน้ำภายในก้อนโดของข้าวเกรียบเนื่องจากโปรตีนมีความสามารถในการดูดซับกับน้ำได้ดีกว่าแป้ง เมื่อได้รับความร้อนมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนในการเกิดเจลก่อนกระบวนการเจลตาติในเซชันของแป้ง โดยระหว่างการเกิดเจลเนื่องจากความร้อนโมเลกุลของน้ำจะถูกยึดจับกับโครงสร้างของเจลโปรตีน ทำให้เกิดเจลที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบร่างแหของโปรตีนซึ่งมีโมเลกุลของน้ำที่ถูกจับอยู่ภายในโครงสร้างของเจล ทำให้โมเลกุลของน้ำไม่สามารถเคลื่อนที่ออกมาภายนอกได้โดยง่ายในระหว่างการนี้ ซึ่งเมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นจะมีต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพของโปรตีน (Denature) ทำให้เกิดการรวมตัวกันของโปรตีน มีผลให้สูญเสียความสามารถในการยึดจับกับโมเลกุลของน้ำให้กับแป้งนำมาใช้ในการเกิดเจลตาติในเซชันของแป้ง ซึ่งเป็นผลให้เม็ดแป้งเริ่มเกิดเจลตาติในเซชันและเกิดการพองตัวขึ้น นอกจากนี้การเติมเกลือลงในข้าวเกรียบจะช่วยให้เม็ดแป้งสามารถเกิดเจลตาติในเซชันได้โดยสมบูรณ์ เนื่องจากเกลือจะช่วยละลายโปรตีนออกจากก้ามเนื้อปลาทำให้เกิดกระจายตัวของโปรตีนในระบบของแป้งและเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของโปรตีน มีผลทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถเข้าไปตรึงอยู่ภายในโครงสร้างแบบร่างแหของโปรตีนได้มากขึ้น ดังนั้นกระบวนการเกิดเจลตาติในเซชันของแป้งในข้าวเกรียบปลา การที่โมเลกุลของน้ำจะถูกยึดจับและเคลื่อนที่อยู่ภายในโครงสร้างร่างแหของโปรตีน ทำให้โมเลกุลของน้ำที่นำมาใช้เพื่อให้เกิดการเจลตาติในเซชันของแป้งถูกจำกัด ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิของการเกิดเจลตาติในเซชันของแป้งสูงขึ้น

Kyaw และคณะ (1999) ศึกษาผลของระยะเวลาหนึ่งต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในระบบของก้อนโดข้าวเกรียบปลาที่มีปริมาณปลาร้อยละ 50 เกลือร้อยละ 2, น้ำตาลร้อยละ 1 โมโนโซเดียมกลูตาเมตร้อยละ 0.1 และน้ำร้อยละ 30 ของน้ำหนักทั้งหมดของแป้งและปลานั้น พบว่าอุณหภูมิที่จุดตรงกึ่งกลางก้อนโดของข้าวเกรียบจะสูงถึง 92°C ภายหลังจากนี้นานเพียง 20 นาที ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวสูงกว่าอุณหภูมิของการเกิดเจลตาติในเซชันของแป้งที่ผสมในก้อนโดของข้าวเกรียบ ดังนั้นในระบบของข้าวเกรียบปลาดังกล่าวเมื่อให้ระยะเวลาในการนี้นาน 20 นาที ก็มีผลทำให้ตรงกึ่งกลางภายในก้อนโดของข้าวเกรียบสามารถเกิดเจลตาติในเซชันได้โดยสมบูรณ์

5. การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบในระหว่างเก็บรักษา

ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบเมื่อเก็บไว้ระยะเวลาหนึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพที่ส่งผลกระทบต่อผู้บริโภค คือ การสูญเสียความกรอบและการเกิดกลิ่นหืน ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากข้าวเกรียบหลังทอดในน้ำมันมีปริมาณความชื้นต่ำมาก ทำให้สามารถดูดซับความชื้นจากภายนอกได้ง่าย และการทอดในน้ำมันมีผลให้เกิดกลิ่นหืนในข้าวเกรียบระหว่างการเก็บรักษา

5.1 การสูญเสียเนื้อสัมผัสของข้าวเกรียบ

อาหารขบเคี้ยวเป็นอาหารที่มีความกรอบ ความชื้นต่ำ ซึ่งเป็นผลจากในระหว่างกระบวนการทอด ความร้อนจากการทอดจะทำให้ไขมันผลิตภัณฑ์ระเหยเป็นไอและเคลื่อนออกมาที่ผิวและออกจากอาหาร ทำให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงและเกิดโครงสร้างที่เป็นโพรงหรือรูพรุน (Moreira *et al.*, 1999) โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวมีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 1-5 และค่า a_w ประมาณ 0.1 (Robertson, 1992) ซึ่งเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีความชื้นต่ำมาก เมื่อเก็บผลิตภัณฑ์ในบรรยากาศที่มีความชื้นสูงกว่าความชื้นภายในของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์จะดูดความชื้นจากบรรยากาศเข้าไป จนกระทั่งระดับความชื้นภายในผลิตภัณฑ์สมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศ (Labuza, 1982) ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัส ทำให้อาหารขบเคี้ยวสูญเสียความกรอบ โดยความกรอบของอาหารขบเคี้ยวจะลดลงเมื่อมีค่า a_w เพิ่มขึ้น และผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะไม่ถูกยอมรับเมื่อมีค่า a_w เท่ากับ 0.35-0.5 เนื่องจากความชื้นมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ โดยทำให้โครงสร้างของแป้งและของโปรตีนอ่อนตัวและมีความเหนียวขึ้น ทำให้ความแข็งแรงของเนื้อสัมผัสในผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงไป เป็นผลให้ผลิตภัณฑ์มีความกรอบลดลง (Katz and Labuza, 1981; Martinez-Navarrate *et al.*, 2004)

5.2 การเกิดกลิ่นหืนของข้าวเกรียบ

ข้าวเกรียบเป็นอาหารขบเคี้ยวที่ผ่านกระบวนการทอดในน้ำมัน ทำให้ข้าวเกรียบมีส่วนประกอบที่เป็นน้ำมัน เมื่อเก็บรักษาไว้ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพเนื่องจากการเกิดกลิ่นหืนของไขมัน (Perkins, 1996) ซึ่งสามารถเกิดได้ดังนี้

5.2.1 การสลายตัวของไขมัน (Hydrolytic rancidity) เกิดจากการแตกตัวของไขมัน โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นขณะที่ทอดอาหารที่มีน้ำและใช้อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระขึ้น ซึ่งมีผลให้เกิดออกซิเดชัน

5.2.2 การเกิดออกซิเดชันของไขมัน (Oxidation rancidity) หรือเรียกว่าออโตออกซิเดชัน (Auto oxidation) เป็นการหืนที่เกิดจากไขมันสัมผัสกับออกซิเจนโดยตรง โดยกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวจะทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างออกซิเจนที่มีในอากาศ โดยเกิดขึ้นตลอดเวลา ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบลูกโซ่ ซึ่งทำให้ได้สารไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide) จำนวนมาก ซึ่งสารเหล่านี้เป็นสารประกอบที่ไม่เสถียร จะสลายตัวทำให้ได้สารประกอบอัลดีไฮด์ คีโตน แอลกอฮอล์ และสารประกอบของกรดได้ (Min, 1998) ซึ่งทำให้เกิดกลิ่นหืนในข้าวเกรียบ นอกจากนี้ยังมีความร้อน แสง และโลหะที่มีผลช่วยเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วย

6. การบรรจุ

ข้าวเกรียบเป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่มีความชื้นและมีน้ำมันเป็นส่วนประกอบ การเก็บรักษาข้าวเกรียบเมื่อระยะเวลาการเก็บนานขึ้น มีผลทำให้เกิดการสูญเสียความกรอบจากการดูดความชื้นและการเกิดกลิ่นหืนเนื่องจากการเกิดออกซิเดชันของไขมัน ส่งผลให้คุณภาพของข้าวเกรียบเปลี่ยนแปลงและผู้บริโภคไม่ยอมรับ ซึ่งการเลือกบรรจุภัณฑ์เพื่อบรรจุอาหารขบเคี้ยวเป็นปัจจัยหนึ่งที่สามารถป้องกันการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวเกรียบในระหว่างการเก็บรักษา ดังนั้นบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวควรมีสสมบัติ (Sacharow and Griffin, 1980) ดังนี้

6.1 การป้องกันการเกิดกลิ่นหืน ข้าวเกรียบเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีไขมันหรือน้ำมันเป็นองค์ประกอบจึงง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาเกิดออกซิเดชัน เนื่องจากไขมันสัมผัสกับออกซิเจนโดยตรง และสามารถถูกกระตุ้นด้วยความร้อน แสง เป็นต้น ซึ่งอาจก่อให้เกิดกลิ่นหืนของข้าวเกรียบ ซึ่งบรรจุภัณฑ์ที่มีการเคลือบด้วยอะลูมิเนียมจะสามารถป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนได้ดีกว่าบรรจุภัณฑ์พลาสติกใส

6.2 การรักษาความชื้น ข้าวเกรียบภายหลังจากกระบวนการทอดในน้ำมัน มีผลให้ปริมาณชื้นต่ำ และโครงสร้างมีลักษณะเป็นรูพรุน จึงทำให้ง่ายต่อการดูดความชื้นจากภายนอก ซึ่งบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมควรจะสามารถป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี

6.3 การป้องกันกลิ่น บรรจุภัณฑ์ที่ดีควรป้องกันกลิ่นได้ดี เพื่อป้องกันกลิ่นและกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงไป

รณิดา นิลวิเชียร (2541) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวจากปลาในระหว่างการเก็บรักษาโดยบรรจุในถุง 2 แบบ คือถุงโอเรียลเต็ทโพลีโพรพิลีนเคลือบอะลูมิเนียม และถุงโพลีโพรพิลีน พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เก็บในถุงโอเรียลเต็ทโพลีโพรพิลีนเคลือบ

อะลูมิเนียมมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในถุงโพลีโพรพิลีน เนื่องจากความชื้นในบรรยากาศสามารถซึมผ่านถุงพลาสติกทั้งสองชนิดได้ แต่อัตราการซึมผ่านของไอน้ำในถุงโอเรียลเท็ดโพลีโพรพิลีนเคลือบอะลูมิเนียมน้อยกว่า (0-0.02 กรัม/ตรม./วัน) ถุงโพลีโพรพิลีน (0.60-0.90 กรัม/ตรม./วัน)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งดิบผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาธูและการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งผสมในระหว่างการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบ
2. เพื่อศึกษาผลของสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งผสมต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบหลังทอดระหว่างการเก็บรักษา