

## บทที่ 2

### ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

#### 2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับข้าว

ข้าวเป็นพืชวงศ์หญ้า (Gramineae) สกุล *Oryza* พืชเผ่าพันธุ์นี้มีอยู่ประมาณ 25 ชนิด ในจำนวนนี้มีอยู่สองชนิดเท่านั้นที่ปลูกเพื่อใช้เป็นอาหาร คือ *Oryza sativa* ที่ปลูกกันทั่วไป ในประเทศผู้ปลูกข้าว และ *Oryza glaberrima* ที่ปลูกกันในบางส่วนของทวีปแอฟริกา ชนิดที่เหลือถือเป็นข้าวป่า

##### 2.1.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

เมล็ดข้าว (rice fruit, rice grain, rice seed) เป็นผลชนิด caryopsis เนื่องจากส่วนที่เป็นเมล็ดเดี่ยว (single seed) ติดแน่นอยู่กับผนังของรังไข่หรือเยื่อหุ้มผล (pericarp) ดังภาพประกอบ

2.1 เมล็ดข้าวประกอบด้วยส่วนใหญ่ๆ 2 ส่วนคือ

1. ส่วนที่ห่อหุ้ม เรียกว่ากลีบ (hull หรือ husk) กลีบ ประกอบด้วย เปลือกใหญ่ (lemma) เปลือกเล็ก (palea) หาง (awn) ขั้วเมล็ด (rachilla) และกลีบรองเมล็ด (sterile lemmas)

2. ส่วนที่รับประทานได้ เรียกว่า ข้าวกล้อง (caryopsis หรือ brown rice) ข้าวกล้อง หรือเมล็ดข้าวที่เอาเปลือกออกแล้ว ประกอบด้วย

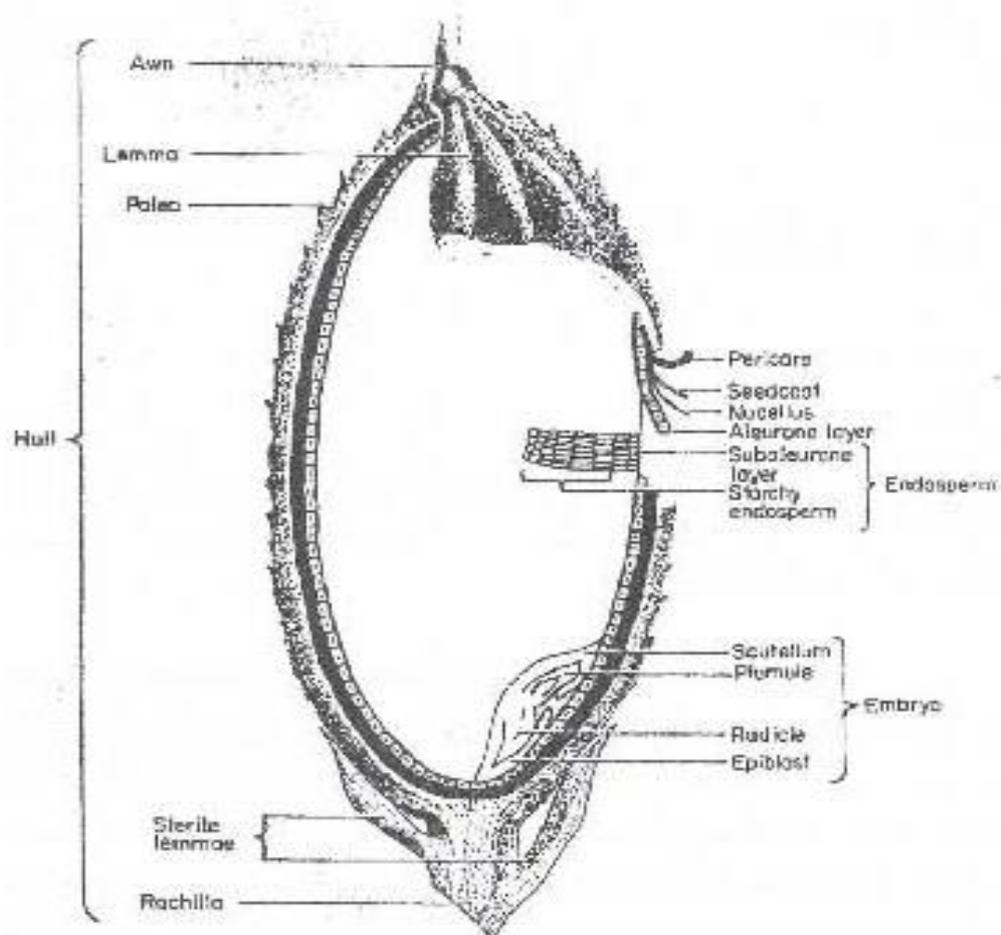
1) เยื่อหุ้มผล (pericarp หรือ fruit coat) ประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 3 ชั้น คือ epicarp, mesocarp และ endocarp ทั้งนี้เยื่อหุ้มผลมีลักษณะเป็น fibrous ผนังเซลล์ประกอบด้วย โปรตีนเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส

2) เยื่อหุ้มเมล็ด (tegmen หรือ seed coat) อยู่ถัดจากเยื่อหุ้มผลเข้าไป ประกอบด้วย เนื้อเยื่อสองชั้นเรียงกันเป็นแถวเป็นที่อยู่ของสารประเภทไขมัน (fatty material)

3) เยื่ออาลูโรน (aleurone) อยู่ต่อจากเยื่อหุ้มเมล็ด ห่อหุ้มส่วนที่เป็นแป้ง (starchy endosperm) และคัพภะ โดยเยื่ออาลูโรนมีโปรตีนสูง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยน้ำมัน เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส

4) ส่วนที่เป็นแป้ง (starch endosperm) หรือส่วนที่เป็นข้าวสาร อยู่ชั้นในสุดของเมล็ดประกอบด้วยแป้งเป็นส่วนใหญ่และมีโปรตีนอยู่บ้าง แป้งในเมล็ดข้าวมี 2 ชนิด คือ อะมิโลส และอะมิโลเพคติน

5) คัพภะ (embryo) อยู่ติดกับเอนโดสเปิร์มทางด้าน lemma เป็นส่วนที่จะเจริญเป็นต้นต่อไป คัพภะประกอบด้วย ต้นอ่อน (plumule) รากอ่อน (radicle) เยื่อหุ้มต้นอ่อน (coleoptile) เยื่อหุ้มรากอ่อน (coleorhiza) ท่อน้ำท่ออาหาร (epiblast) และใบเลี้ยง (scutellum) คัพภะเป็นส่วนที่มีโปรตีนและไขมันสูง



ภาพประกอบ 2.1 ลักษณะโครงสร้างของเมล็ดข้าว  
ที่มา: <http://forums2.popcornfor2.com/index>.

### 2.1.2 การจำแนกชนิดข้าว

ชนิดของข้าวจำแนกตามลักษณะส่วนประกอบทางเคมี แบ่งออกเป็น 2 ประเภท

2.1.2.1 ข้าวเหนียว (Glutinous rice หรือ Waxy rice) เมล็ดข้าวสารจะมีลักษณะขุ่น ข้าวเหนียวประกอบด้วยแป้งประเภทอะมิโลเพกตินประมาณร้อยละ 95 มีแป้งประเภทอะมิโลสน้อยมาก หรือบางพันธุ์ไม่มีเลย แต่แป้งที่มีอะมิโลเพกตินเป็นส่วนใหญ่เมื่อหุงจะสุกง่าย นุ่มจับตัวติดเหนียว เป็นก้อนและมีลักษณะใส

2.1.2.2 ข้าวเจ้า (Nonglutinous rice) เมล็ดข้าวสารจะมีสีขาวใส มีปริมาณอะมิโลสเป็นสัดส่วนประกอบทางเคมีประมาณร้อยละ 20-34 ที่เหลือเป็นอะมิโลเพกติน ซึ่งมีผลให้ข้าวสารที่นำไปหุงเป็นข้าวสุกจะมีสีขาวขุ่น มีลักษณะร่วนไม่เกาะติดกัน อัตราส่วนของส่วนประกอบทางเคมีทั้งสองชนิดนี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ข้าวมีคุณสมบัติการหุงต้มที่ต่างกัน คือ ข้าวที่มีอะมิโลสสูงจะดูดน้ำ

และขยายปริมาตรในระหว่างการหุงต้มได้มากกว่าข้าวอะมิโลสต่ำ ทำให้ข้าวสุกและร่วน ส่วนข้าวที่มีอะมิโลสต่ำ จะดูดน้ำและขยายตัวได้น้อยกว่าข้าวที่มี อะมิโลสสูง ข้าวจะเหนียวและนุ่มกว่า (ดังตาราง 2.1)

ตาราง 2.1 การจัดแบ่งประเภทข้าวตามปริมาณอะมิโลส

ประเภทข้าว	ปริมาณอะมิโลส (%)	ลักษณะข้าวสุก
ข้าวเหนียว	0-2	เหนียวมาก
ข้าวอะมิโลสต่ำ	10-19	เหนียวนุ่ม
ข้าวอะมิโลสปานกลาง	20-25	ค่อนข้างร่วน ไม่แข็ง
ข้าวอะมิโลสสูง	25-34	ร่วน แข็ง

ที่มา: อนุชิตา มุ่งงาม (2553)

นอกจากนี้ข้าวเจ้าที่มีเมล็ดสี เมื่อนำไปทดสอบด้วยน้ำยาไอโอดีนจะกลายเป็นสีน้ำเงินเข้ม (blue black) เนื้อเมล็ดของข้าวเจ้าประกอบด้วย คาร์โบไฮเดรตทั้งชนิดอะมิโลสและอะมิโลเพคติน อัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินจะมีผลทำให้มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น ข้าวเจ้าที่เนื้อเมล็ดมีปริมาณอะมิโลสสูงจะทำให้ข้าวสุกร่วนแข็งไม่มีความเหนียว มีการดูดน้ำและขยายตัวได้มากกว่า

แป้งข้าวเจ้ามีการใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย ใช้เป็นส่วนประกอบของแป้งฝุ่นในอุตสาหกรรม เครื่องสำอาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแป้งฝุ่นสำหรับเด็กเนื่องจากแป้งข้าวไม่เป็นพิษและไม่มีสารระคายเคือง และใช้เป็นสารทำให้แข็ง (laundry stiffening agent) ในการซักผ้า ในการผลิตแป้งข้าวเจ้าในประเทศไทยนั้น ถึงจะเป็นการไม่เปียก แต่โปรตีนและสิ่งแปลกปลอมส่วนใหญ่ยังติดอยู่กับแป้งผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ประเภทพลาว์ (rice flour) และ นิยมใช้ข้าวประเภทที่มีอะมิโลสสูง ทั้งนี้เพราะเมื่อนำไปประกอบอาหาร เช่นทอด จะให้ความกรอบแข็ง หรือนำไปนึ่ง เมื่อเย็นลงจะเกิดแผ่นฟิล์ม (เช่น ก๋วยเตี๋ยว เส้นหมี่) ปัจจุบันในประเทศไทยเริ่มมีการผลิตแป้งสตาร์ชจากข้าว (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

ข้าวเจ้าเหลือง 11 (RD11) คู่ผสมไออาร์ 661/ขาวดอกมะลิ 105 ประวัติพันธุ์ได้จากการผสมพันธุ์ระหว่างพันธุ์ไออาร์661 กับพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เมื่อปี พ.ศ. 2512 ที่สถานีทดลองข้าวหันทรา แล้วนำมาคัดเลือกที่สถานีทดลองข้าวบางเขน คัดจนได้พันธุ์ผสมเบอร์ ดับเบิ้ลยูพี 153 การรับรองพันธุ์คณะกรรมการวิจัยและพัฒนากรมวิชาการเกษตรให้ใช้ขยายพันธุ์เป็นพันธุ์รับรองเมื่อวันที่ 13 มกราคม พ.ศ. 2520 ลักษณะประจำพันธุ์เป็นข้าวเจ้า สูงประมาณ 115 เซนติเมตร ไม่ไวต่อช่วงแสง ทรงกอตั้งตรงสีเขียวเข้ม ฟางแข็ง ใบธงยาวปานกลาง แตกกอมาก เมล็ดข้าวเปลือกสีฟางอายุเก็บเกี่ยวประมาณ 135 วันท้องไขปานกลางระยะพักตัวของเมล็ดประมาณ 4 สัปดาห์ เมล็ดข้าวกล้องมีความกว้าง x ยาว x หนา เป็น 2.37 x 7.6 x 1.8 มิลลิเมตร มีปริมาณอะมิโลสร้อยละ 29-32 คุณภาพข้าวสุกร่วน แข็ง (ดังตาราง 2.2)

ตาราง 2.2 การจัดแบ่งข้าวพันธุ์ดีตามคุณภาพการหุงต้มและรับประทาน (\* มีกลิ่นหอม)

พันธุ์ข้าว	เมล็ดยาว (มม.)	อะมิโลส (%)	อุณหภูมิแป้งสุก	ค่าความคงตัว แป้งสุก
<b>ข้าวสุกนุ่มและเหนียว</b>				
ขาวดอกมะลิ 105*	7.4	12-17	ต่ำ	อ่อน
กข 15*	7.5	14-17	ต่ำ	อ่อน
กข 21	7.3	17-20	ต่ำ	อ่อน
<b>ข้าวสุกอ่อน (ข้าวตาแห้ง)</b>				
ขาวปากหม้อ	7.7	24-26	ปานกลาง	อ่อน
ขาวตาแห้ง 17	7.5	26-28	ต่ำ-ปานกลาง	อ่อน
กข 7	7.2	24-28	ปานกลาง	อ่อน
สุพรรณบุรี 60	7.5	19-26	ต่ำ	ปานกลาง
กข 23	7.3	26-30	ปานกลาง	อ่อน
<b>ข้าวสุกร่วนแข็ง (เส้าให้หรือข้าวเคียว)</b>				
เหลืองใหญ่ 148	7.3	30-31	ต่ำ	อ่อน-ปานกลาง
น้ำสะกวย 19	7.6	30-31	ต่ำ	อ่อน-ปานกลาง
เหลืองประทิว 123	7.4	28-32	ต่ำ-ปานกลาง	อ่อน-แข็ง
เล็บมือนาง 111	7.6	29-32	ต่ำ-ปานกลาง	แข็ง-อ่อน
ปิ่นแก้ว 56	7.5	29-31	ต่ำ-ปานกลาง	แข็ง
นางพญา 132	7.4	31-32	ต่ำ-ปานกลาง	อ่อน
กข 11	7.6	29-32	ต่ำ	แข็ง
กข 13	6.9	30-33	ต่ำ-ปานกลาง	อ่อน
กข 25	7.4	30-33	ต่ำ	อ่อน
ปทุมธานี 60*	7.5	27-32	ต่ำ	แข็ง
ชัยนาท 1	7.4	27-30	ต่ำ-ปานกลาง	แข็ง

ที่มา: ดัดแปลงจาก อนุชิตา มุ่งงาม (2553)

### 2.1.3 แป้งข้าว (rice flour)

แป้งข้าวเจ้าจัดเป็นผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมขั้นมูลฐานของผลิตผลทางการเกษตรมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว ไม่จับกันเป็นก้อน ความชื้นไม่ควรเกิน ร้อยละ 13 (ดังตารางที่ 2.3) เมื่อนำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงจะพบเม็ดสตาร์ชขนาดเล็กประมาณ 2-9 ไมโครเมตร มีรูปร่างเป็นเหลี่ยม กระจายตัวอยู่และบางส่วนจับกันเป็นกลุ่ม

ตาราง 2.3 องค์ประกอบทางเคมีโดยทั่วไปของ แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวฟ่าง แป้งข้าวเหนียว แป้งถั่วเขียว และแป้งสาลี

ชนิดของแป้ง	ไขมัน (%)	โปรตีน (%)	ความชื้น (%)	เส้นใย (%)	เถ้า (%)	คาร์โบไฮเดรต (%)
แป้งข้าวเจ้า	0.65	6.64	9.88	0.39	0.51	81.93
แป้งข้าวฟ่าง	5.68	8.45	6.08	2.14	2.24	75.41
แป้งข้าวเหนียว	1.37	7.33	9.57	0.41	0.12	81.02
แป้งถั่วเขียว	0.36	5.02	11.82	0.31	0.26	82.05
แป้งสาลี	0.9	14.2	-	-	0.42	-

ที่มา: ทศพร นามโฮง, (2549)

แป้งข้าวเป็นผลิตภัณฑ์จากข้าวหักในขั้นการแปรรูปปฐมภูมิหรือการแปรรูปขั้นต้นส่วนใหญ่ได้จากแป้งข้าวเจ้ายังไม่สามารถนำมาบริโภคได้โดยตรงจะต้องนำแป้งข้าวไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารกึ่งอาหาร และไม่ใช่อาหารต่อไป โดยการนำข้าวหักซึ่งนิยมใช้ข้าวหักใหญ่ชนิดเอวันเลิศพิเศษ ซึ่งเป็นข้าวหักที่มีความยาว ตั้งแต่ 5.0 ส่วนขึ้นไปประมาณร้อยละ 74 หรือข้าวหักเอวันเลิศ ซึ่งเป็นข้าวหักที่มีความยาวไม่ถึง 6.5 ส่วน และไม่ผ่านตะแกรงเบอร์ 7 นำมาทำความสะอาดด้วยชุดเครื่องทำความสะอาด เช่นเดียวกับการทำความสะอาดข้าวเปลือกและข้าวสารร่วมกัน ได้แก่ การผ่านเครื่องแยกแม่เหล็ก เครื่องแยกหิน และเครื่องขัดขาว เพื่อขัดผิวข้าวหักให้สะอาด ต่อจากนี้เป็นขั้นตอนการโม่ให้เป็นแป้ง ซึ่งทำได้ 3 วิธี คือ

(1) การโม่เปียกหรือการโม่ น้ำ เป็นวิธีการที่ใช้ในการผลิตแป้งข้าวเป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทย เนื่องจากใช้วัตถุดิบเป็นข้าวหักซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าว ยังมีสิ่งเจือปนมาก ต้องทำความสะอาดในระบบแห้งด้วยเครื่องแยกชนิดต่างๆ แล้วจะต้องล้างด้วยน้ำให้สะอาด แช่วข้าวหักจนนิ่ม จึงทำการโม่ด้วยเครื่องโม่แบบหินจานซึ่งใช้ไฟฟ้าในการทำงานของเครื่องโม่ ข้าวหักพร้อมกับน้ำในปริมาณที่เหมาะสม จะทำให้ได้แป้งที่ละเอียดสม่ำเสมอ หลังจากนั้นจึงผ่านน้ำแป้งเข้าเครื่องแยกน้ำออกจากแป้ง โรงงานขนาดใหญ่นิยมใช้เครื่องกรองด้วยแรงอัดสูง (filter press) จะได้ก้อนแป้งที่แห้งมีความชื้นประมาณร้อยละ 40 ต้องทำการตีปนก้อนแป้งให้เป็นผงก่อน จึงผ่านเข้าเครื่องอบแป้งให้แห้ง อาจใช้วิธีเป่าด้วยลมร้อน จนแป้งเป็นผงแห้ง นำมาผ่านเครื่องบดและร่อนเพื่อให้ได้แป้งที่มีขนาดสม่ำเสมอ โดยทั่วไปจะประมาณ 180 ไมโครเมตร มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 13

(2) การโม่แห้ง เป็นการนำข้าวหักที่ผ่านระบบการทำความสะอาดแบบแห้งแล้วเข้าสู่เครื่องโม่หรือบดแห้งเป็นแป้งผง ร่อนผ่านเครื่องร่อนให้มีขนาดสม่ำเสมอ

(3) การโม่แบบผสม มีขั้นตอนการโม่คล้ายคลึงกับวิธีการโม่เปียกในช่วงล้างข้าวหักและแช่วข้าวหักจนนิ่ม ต่อจากนั้นนำข้าวหักขึ้นจากน้ำแช่ให้สะเด็ดน้ำแล้วผ่านไปยังเครื่องอบให้ข้าวแห้งระดับหนึ่ง (อาจจะประมาณร้อยละ 15-17) จึงนำข้าวหักเข้าบดหรือโม่แบบแห้ง ตามวิธีการโม่แห้งจนได้

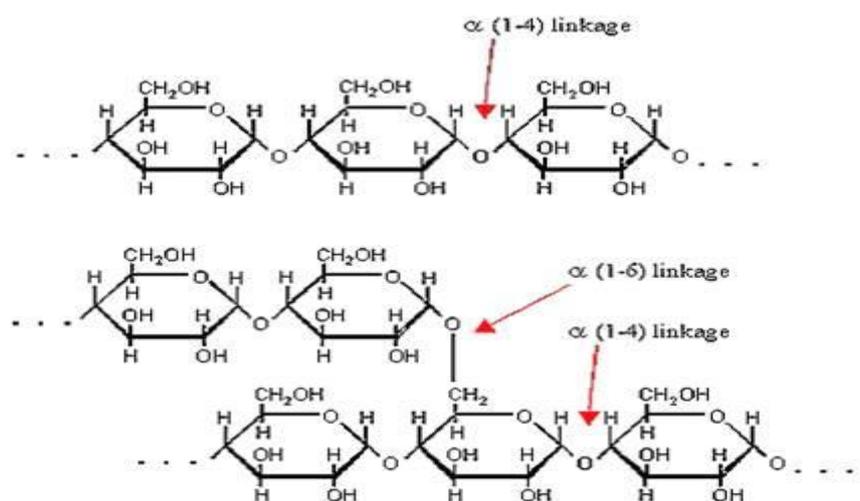
แป้งแห้งผ่านเข้าเครื่องร่อนแป้งให้มีขนาดสม่ำเสมอ (180 ไมโครเมตร) จะเห็นได้ว่า กรรมวิธีการโม่จะผสมระหว่างโม่เปียกกับโม่แห้งเข้าด้วยกันจึงเรียกว่า วิธีการโม่แบบผสม

แป้งข้าวที่ผลิตขายทั่วไปจะมี 2 ชนิดคือ แป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว ซึ่งขายทั้งในประเทศและต่างประเทศเพิ่มมากขึ้น (ดังตาราง 8) ดังนั้นเพื่อเป็นการส่งเสริมอุตสาหกรรมการผลิตแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว ให้มีคุณภาพ และเป็นแนวทางในการตรวจสอบคุณภาพระหว่างผู้ซื้อและผู้ขายได้ สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2529) กระทรวงอุตสาหกรรม จึงได้กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรม แป้งข้าวเจ้า (มอก.638-2529) โดยกำหนดคุณลักษณะที่ต้องการ วัตถุประสงค์อาหาร สุขลักษณะ การบรรจุ เครื่องหมาย และฉลาก การคัดตัวอย่าง และเกณฑ์ตัดสิน ในการทดสอบแป้งข้าวจ้าวนี้ มีสาระสำคัญ บางประการ คือ แป้งข้าวจ้าวต้องเป็นผงละเอียดไม่จับกันเป็นก้อน ส่วนที่ค้ำบนตะแกรง 180 ไมโครเมตร ต้องไม่เกินร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก ต้องมีสีขาวหรือขาวนวล มีกลิ่นตามธรรมชาติของแป้งข้าวเจ้า ไม่มีกลิ่นอับ หืน เหม็นเปรี้ยว หรือกลิ่นไม่พึงประสงค์อื่นๆ ต้องปราศจากสิ่งแปลกปลอม เมื่อดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นเม็ดสตาร์ชข้าวจ้าวมีลักษณะเป็นรูปทรงหลายเหลี่ยมขนาด 2-9 ไมโครเมตร

## 2.2 องค์ประกอบของเม็ดแป้ง

### 2.2.1 แป้ง/สตาร์ช

โครงสร้างทางเคมีของแป้งสตาร์ชจะประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) โดยส่วนใหญ่แป้งสตาร์ชจะประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะมิโลส (amylose) และอะมิโลเพกติน (amylopectin) แสดงดังภาพประกอบ 2.2

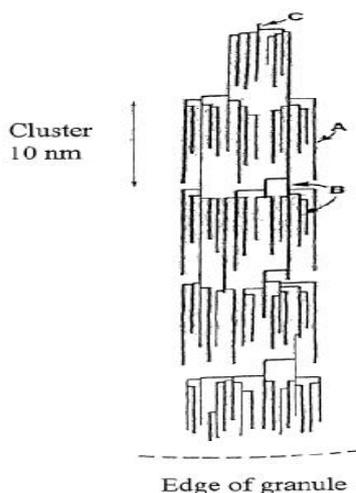


ภาพประกอบ 2.2 โครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน

ที่มา: <http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter2.html>

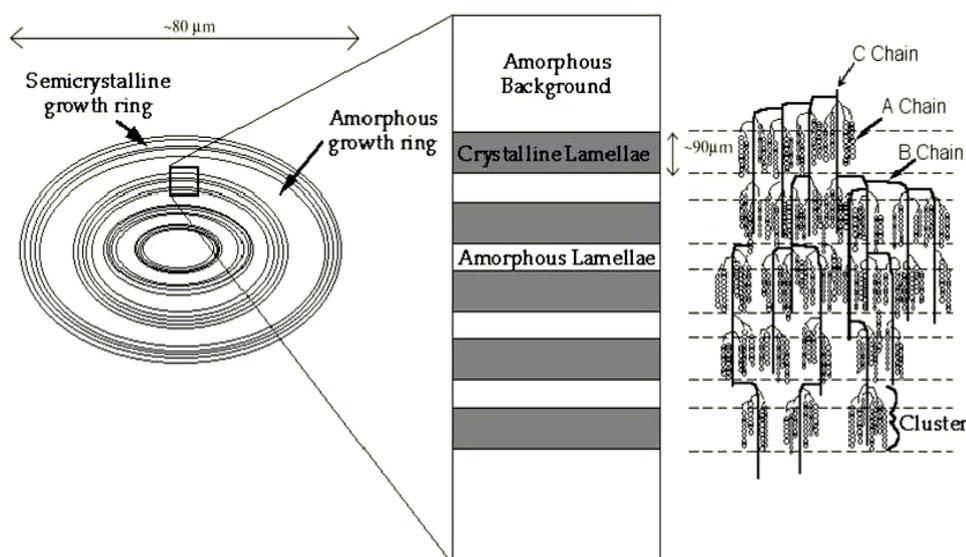
อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 1,000-6,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4-glycosidic linkage และอาจพบกิ่งก้านสาขาในโมเลกุลของอะมิโลสได้บ้างในปริมาณเล็กน้อย อะมิโลสในแป้งสตาρχแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน และมีค่าระดับขั้นของพอลิเมอร์ไรเซชัน (degree of polymerization, DP) แตกต่างกันด้วยตำแหน่งของอะมิโลสภายในเม็ดสตาρχขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแป้งสตาρχ อะมิโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะมิโลเพกติน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (amorphous region) และส่วนผลึก (crystalline region) โครงสร้างของอะมิโลสมีทั้งแบบสายเดี่ยวและสายคู่ เมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (helix) เกลียวที่คล้ายตัวหรือม้วนบางช่วง (interrupted helix) หรือม้วนอย่างไม่เจาะจง (random coil) นอกจากนี้โครงสร้างของอะมิโลสยังขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลด้วย ซึ่งถ้ามีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,500-160,000 จะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็งแรง (double helix) ส่วนอะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 หรือมากกว่า 160,000 จะมีโมเลกุลเป็นลักษณะม้วนอย่างไม่เจาะจง และอาจมีบางส่วนละลายได้ (Whistler and Daniel, 1984)

อะมิโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส โครงสร้างจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วย  $\alpha$ -1,4-glycosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งก้านสาขาซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสสายสั้นที่มีขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วง 10-60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,6-glycosidic linkage (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) โครงสร้างแบบกิ่งของอะมิโลเพกตินจะประกอบด้วยสายโซ่ 3 ชนิด คือ สาย A (A chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (unbranched structure) สาย B (B chain) มีโครงสร้างแบบกิ่ง เชื่อมต่อกับสายอื่น ๆ 2 สายหรือมากกว่า และสาย C (C chain) ซึ่งเป็นสายแกนที่ประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ แสดงดังภาพประกอบ 2.2 ในอะมิโลเพกตินแต่ละโมเลกุลจะประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น สำหรับอะมิโลเพกตินของแป้งสตาρχข้าว สายส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 80-90 จะประกอบด้วยกลุ่มเดี่ยวๆ และสายที่เหลืออีกร้อยละ 10-20 จะเป็นส่วนเชื่อมต่อของแต่ละกลุ่ม (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

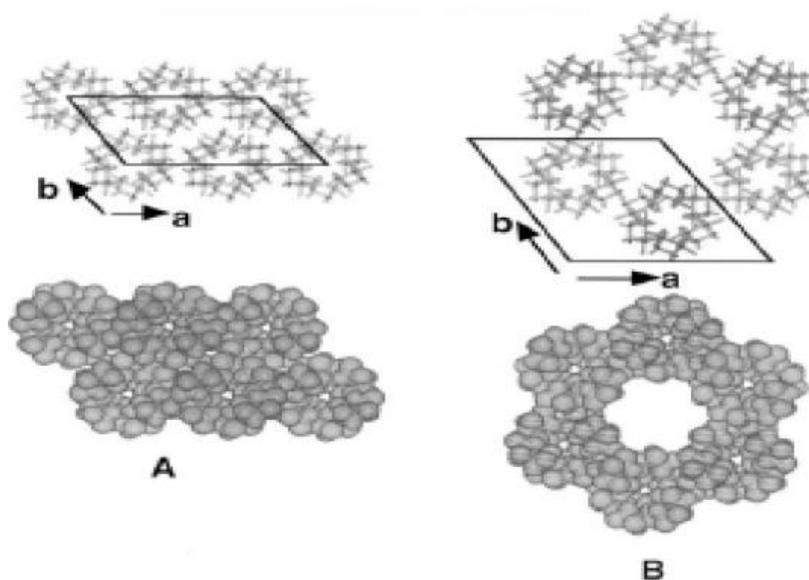


ภาพประกอบ 2.3 ลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งของอะมิโลเพกติน

แป้งสตา์ชที่พบในธรรมชาติจะอยู่ในรูปของเม็ดสตา์ชขนาดเล็ก มีขนาด รูปร่างและลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของแป้งสตา์ชนั้น ๆ โดยแป้งสตา์ชข้าว (rice starch) เป็นแป้งที่มีขนาดของเม็ดสตา์ช (starch granule) เล็กที่สุดในกลุ่มเมล็ดพืชจากธัญพืช ซึ่งจะมีขนาดของเม็ดสตา์ชอยู่ในช่วง 3-10 ไมโครอน (Juliano, 1984) รูปร่างลักษณะเป็นเหลี่ยมหลายเหลี่ยม มักเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดประมาณ 150 ไมโครอน ซึ่งแป้งสตา์ชข้าวจะประกอบด้วยสัดส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินในปริมาณที่แตกต่างกัน (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและสายพันธุ์ของข้าว เม็ดสตา์ชมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวเป็นแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินจะจัดเรียงตัวในเม็ดสตา์ชเป็นโครงสร้างทั้งส่วนอสัณฐาน (amorphous region) และส่วนที่เป็นผลึก (crystalline region) โดยส่วนอสัณฐานของเม็ดสตา์ชจะประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลสและสายโซ่ยาวของอะมิโลเพกติน (Jacobs and Delcour, 1998) ขณะที่ส่วนที่เป็นผลึกเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของอะมิโลเพกตินในแนวรัศมีเป็นชั้นๆ ต่อกันของคลัสเตอร์อะมิโลเพกติน (series of stacked amylopectin clusters) ซึ่งในแต่ละคลัสเตอร์จะประกอบด้วยบริเวณที่เป็นส่วนรวมของจุดที่แตกกิ่งที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบเรียกว่า amorphous lamellae และบริเวณที่มีสายโซ่กิ่งของอะมิโลเพกตินที่จัดเรียงตัวแบบเกลียวม้วนคู่ (double helices) อย่างเป็นระเบียบ เรียกบริเวณส่วนนี้ว่า crystalline lamellae แสดงดังภาพประกอบ 2.4



ภาพประกอบ 2.4 ลักษณะโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline structure) ของเม็ดสตา์ช  
ที่มา: Jacobs and Delcour (1998)

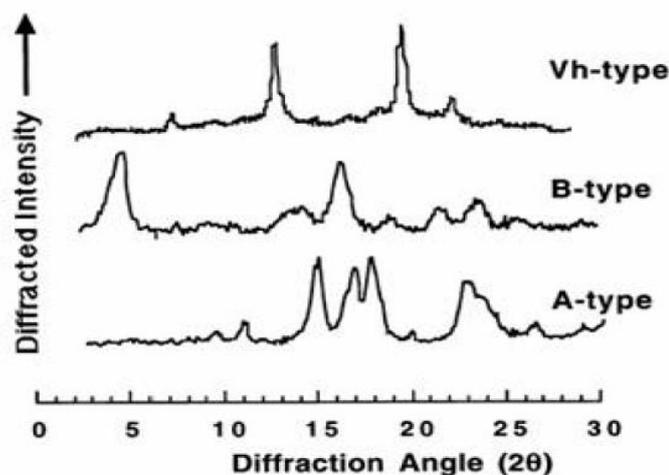


ภาพประกอบ 2.5 ลักษณะโครงสร้างผลึกชนิด A และ B  
ที่มา: Buleon *et al* (1998)

เม็ดสตาร์ชมีลักษณะโครงสร้างผลึกทั้งหมด 4 แบบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของสายเกลียวคู่ ถ้ามีการจัดเรียงตัวหนาแน่นมากและมีปริมาณน้ำต่ำจะเกิดเป็นผลึกแบบ A (แบ่งจากธัญพืชต่างๆ เช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวโพด เป็นต้น) ถ้ามีการจัดเรียงตัวกันหลวมๆ และมีปริมาณน้ำสูงจะเกิดผลึกแบบ B (แบ่งจากพืชหัว เช่น แป้งมันฝรั่ง) แสดงดังภาพที่ 2.5 แต่ถ้าเกิดการเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C (แบ่งจากพืชตระกูลถั่ว) นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างผลึกแบบ V อีก 1 ชนิด ซึ่งจะเป็นลักษณะผลึกที่เกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีขั้ว แต่โดยทั่วไปเป็นแป้งสตาร์ชที่เกิดเจลาติไนซ์แล้วจับตัวกับไขมัน (Zobel, 1998)

โครงสร้างผลึกที่ต่างกันของแป้งสตาร์ชจะส่งผลให้มีลักษณะการกระจายตัวของแสงต่างกัน ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยใช้เทคนิคเอกซ์-เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction, XRD) ซึ่งแป้งสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A จะให้พีกคู่ (doublet peak) ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  ที่  $17-18^\circ$  และพีกเดี่ยว (singlet peak) ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  ที่  $23^\circ$  แต่ไม่มีพีกที่ตำแหน่ง  $2\theta$  ที่  $5.6^\circ$  ซึ่งจะพบในสตาร์ชที่มาจากธัญพืชเป็นส่วนใหญ่ ขณะที่แป้งสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B จะให้ singlet peak ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  ที่  $5.6$  และ  $17^\circ$  แต่ไม่มีพีกที่ตำแหน่ง  $2\theta$  ที่  $18^\circ$  และมี doublet peak ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  ที่  $22$  และ  $24^\circ$  ซึ่งจะพบในแป้งสตาร์ชที่มาจากพืชหัว ส่วนแป้งสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ C ให้ลักษณะร่วมกันระหว่างผลึกแบบ A และ B กล่าวคือ มี singlet peak ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  ที่  $5.6$  และ  $17.9^\circ$  ตัวอย่างเช่น แป้งสตาร์ชจากพืชตระกูลถั่ว ราก ลำต้น และแป้งสตาร์ชจากผลไม้บางชนิด (Buleon *et al.*, 1998)

นอกจากนี้ลักษณะผลึกแบบ V ซึ่งเป็นรูปแบบที่เกิดจากการรวมตัวกันของอะมิโลสกับไขมันเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับไขมัน (amylose-lipid complex) จะให้ singlet peak ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  ที่  $13$  และ  $20^\circ$  (Derycke *et al.*, 2005)



ภาพประกอบ 2.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เรย์ของแป้งสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A, B และ  $V_h$  ที่มา: Buleon *et al* (1998)

### 2.2.2 ลิปิด (Lipid)

ไขมันที่สกัดได้จากเมล็ดแป้งอาจเป็นไขมันที่เป็นส่วนหนึ่งของเมล็ดแป้งจริงๆ หรืออาจมาจากเนื้อเยื่อส่วนอื่นๆ และมาจับอยู่กับเมล็ดแป้งในขณะที่ทำการสกัดแป้ง แป้งจากเอนโดสเปิร์มของพวกธัญพืชจะมีลักษณะเฉพาะคือ มีลิปิดเป็นส่วนหนึ่งของเมล็ดแป้ง (integral components) ในขณะที่เมล็ดแป้งจากมันฝรั่ง เม็ดถั่วประเภทต่างๆ หรือจากส่วนอื่นๆ ของธัญพืชไม่พบ integral lipids ลิปิดที่จับอยู่กับเมล็ดแป้งนี้แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ลิปิดที่มาจากเนื้อเยื่ออื่นๆ เช่น จากเมมเบรนและสเฟียร์โรโซม ซึ่งจะจับอยู่กับเมล็ดแป้งแบบหลวมๆ ประกอบด้วยลิปิดพวกไตรกลีเซอไรด์ ไดเอซิลไกลโคลิปิดและ ฟอสโฟลิปิด ระหว่างการเจริญของเมล็ดข้าว จะเกิดการย่อยสลายลิปิดบางส่วนได้กรดไขมันและโมโนเอซิลไตรกลีเซอไรด์ ในขณะที่สกัดแป้ง แม้ว่าเมล็ดแป้งจะพองตัวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่กรดไขมันและโมโนเอซิลลิปิดเหล่านี้สามารถถูกดูดซึมเข้าไปในบริเวณชั้นผิวของเมล็ดแป้งได้ จึงเรียกลิปิดส่วนนี้ว่า starch surface lipids ส่วนลิปิดที่เป็นส่วนหนึ่งของเมล็ดแป้งอย่างแท้จริงจะพบอยู่ภายในเมล็ดแป้ง ในแป้งข้าวบาร์เลย์และข้าวสาลีพบว่า เป็นลิปิดประเภทไลโซฟอสโฟลิปิดทั้งหมด ในขณะที่ในแป้งข้าวเจ้า ข้าวโอ๊ต และข้าวโพด พบว่าเป็นกรดไขมันประมาณร้อยละ 30-60 แป้งข้าวเหนียว ข้าวโพดเหนียว ข้าวบาร์เลย์เหนียว และข้าวสาลีเหนียวซึ่งมีอะมิโลสต่ำมาก พบว่ามีปริมาณลิปิดต่ำมากเช่นกัน และแป้งจากข้าวเหล่านี้ เมื่อกลายพันธุ์ให้มีอะมิโลสสูงก็จะพบลิปิดในปริมาณมากด้วย แป้งข้าวโอ๊ตมีลิปิด อะมิโลสและฟอสฟอรัสสูงกว่าแป้งจากธัญพืชอื่นๆ แป้งจากหัว (tuber) หรือราก (root) เช่น แป้งมันฝรั่งและมันสำปะหลังมีไขมันในปริมาณที่ต่ำ (ร้อยละ 0.1 หรือน้อยกว่า) เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งจากธัญพืช (ข้าวโพด ข้าวสาลีและข้าวฟ่าง) ซึ่งมีไขมันประมาณร้อยละ 0.6-0.8 การมีไขมันในแป้งจะมีผลต่อคุณสมบัติของแป้งเนื่องจากไขมันหรือลิปิด (lipid) จะเกิดการรวมตัวกับอะมิโลสในแป้งเกิดเป็นสาร

เชิงซ้อนของอะมิโลส-ลิปิด (amylose-lipid complex) ซึ่งสารเชิงซ้อนนี้ไม่ละลายน้ำ แต่การจับกันจะถูกทำลายเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 120°ซ) พันธะที่ยึดเหนี่ยวกันจะถูกทำลายทำให้ส่วนของอะมิโลส สามารถละลายออกมาได้ (Davies *et al.*, 1980) สารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลส และไขมันจะมีผลทำให้กำลังการพองตัว (swelling power) และค่าการละลาย (solubility) ของแป้งลดลง นอกจากนี้ไขมันยังทำให้แป้งเกิดการเหม็นหืน (rancid) ขณะเก็บรักษาด้วย

### 2.2.3 โปรตีน (Protein)

โปรตีนที่สกัดได้จากเมล็ดแป้งก็แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มเช่นเดียวกัน คือ เป็นโปรตีนที่จับอยู่ที่ผิวของเมล็ดแป้ง (surface protein) ซึ่งสกัดออกได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินไนซ์ และโปรตีนที่เป็นส่วนหนึ่งของเมล็ดแป้ง (integral protein) ซึ่งการสกัดต้องใช้อุณหภูมิใกล้เคียงหรือสูงกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินไนซ์ รายงานว่าประมาณร้อยละ 10 ของโปรตีนทั้งหมดที่สกัดได้จากแป้งสาลีเป็นโปรตีนที่จับอยู่ที่ผิว โปรตีนที่อยู่ภายในเมล็ดแป้งส่วนใหญ่เป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่สังเคราะห์แป้ง รายงานว่าพบโปรตีน 5 ชนิดที่มีขนาดโมเลกุล 60, 75, 85, 100 และ 105 kDa ในสารสกัดจากเมล็ดแป้งสาลีที่ทำการสกัดที่ 100°ซ โดยใช้ 50 mM Tris (pH 8) ที่มี 10% SDS และแยกโดย SDS-PAGE แถบโปรตีนที่เห็นชัดที่สุดคือ ที่ 60 kDa ซึ่งพบว่าเป็นเอนไซม์ granular bound starch synthase (GBSS) ในแป้งตระกูล waxy ทั้งหมดจะไม่พบโปรตีนนี้ ส่วนโปรตีนขนาด 85 kDa น่าจะเป็น starch branching enzyme (SBE IIb) และโปรตีนขนาด 75 kDa น่าจะเป็น starch synthase มันฝรั่งและมันสำปะหลังมีโปรตีนในปริมาณที่ต่ำ (ร้อยละ 0.1 หรือน้อยกว่า) เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งจากธัญพืช เช่น ข้าวโพดและข้าวสาลี ซึ่งมีปริมาณโปรตีนร้อยละ 0.3-0.5 โปรตีนที่อยู่ในแป้งจะเกี่ยวข้องกับการทำให้เกิดกลิ่นรสและการเกิดฟองในแป้ง ในแป้งสาลีโปรตีนตัวหนึ่งที่สนใจศึกษากันมากคือ friabilin เนื่องจากเป็นโปรตีนที่เชื่อว่าเกี่ยวข้องกับความแข็งของข้าว

### 2.2.4 ฟอสฟอรัส (Phosphorus)

ฟอสฟอรัสในแป้งจากธัญพืชมักพบในรูปของฟอสโฟลิปิด (lysophospholipid) ในขณะที่แป้งจากรากและหัวมักมีฟอสฟอรัสในปริมาณที่ต่ำและอยู่ในรูปของฟอสเฟต แป้งมันฝรั่งเป็นแป้งจากหัวที่มีปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตเอสเทอร์ (phosphate ester) สูง ปริมาณหมู่ฟอสเฟตในแป้งมันฝรั่งมีประมาณ 1 หมู่ ต่อ 200-400 หน่วยของน้ำตาลกลูโคส โดยหมู่ฟอสเฟตทำให้แป้งมีคุณสมบัติเป็น polyelectrolyte ทำให้เมล็ดแป้งกระจายตัวในน้ำและพองตัวได้ดี เนื่องจากโมเลกุลแป้งผลักกันเอง

### 2.2.5 เถ้าและสารอนินทรีย์อื่นๆ (Ash & inorganic components)

สารอนินทรีย์อื่นๆ ในแป้ง เช่น แคลเซียม โปแตสเซียม แมกนีเซียม และสังกะสี พบในปริมาณเล็กน้อย ปริมาณของสารเหล่านี้หาได้จากสิ่งที่เหลือจากการเผาที่อุณหภูมิเฉพาะ แป้งมันฝรั่งมีหมู่ฟอสเฟตในรูปของเกลือที่มีอยู่ในมันฝรั่งหรือได้จากกระบวนการล้างน้ำ ปริมาณเถ้าของแป้งมันฝรั่งเท่ากับปริมาณหมู่ฟอสเฟต ปริมาณเถ้าบางส่วนในแป้งธัญพืช คือ ปริมาณฟอสโฟลิปิด ปริมาณเถ้าของแป้งที่ใช้ในทางการค้าโดยทั่วไป คือ สารประกอบโลหะของโซเดียม โพตัสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม

### 2.2.6 ความชื้น (Moisture)

ปริมาณความชื้นของแป้งขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity; RH) ของอากาศขณะที่เก็บผลิตภัณฑ์ ถ้ามีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำแป้งจะมีความชื้นต่ำด้วย ถ้าความชื้นสูงเม็ดแป้งจะดูดซับน้ำไว้มาก ปริมาณความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ของแป้งขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง ภายใต้สภาวะอากาศปกติแป้งโดยทั่วไปจะมีความชื้นร้อยละ 10-20

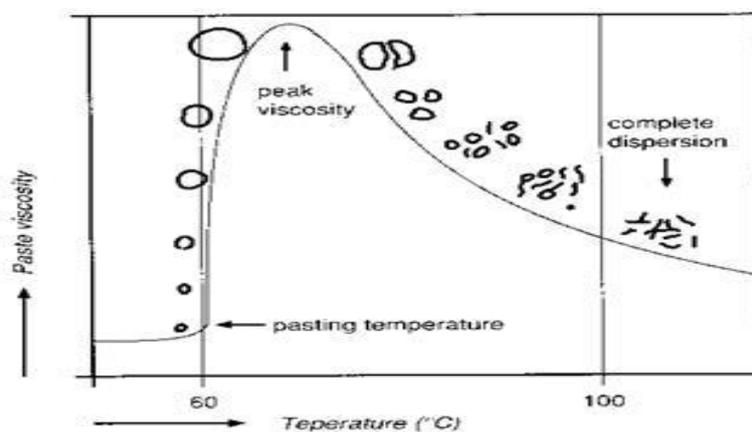
## 2.3 สมบัติด้านความร้อนของแป้ง

เม็ดสตาร์ชมีคุณสมบัติเป็น optical birefringence คือ การบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ สมบัตินี้บ่งชี้ว่าสตาร์ชมีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ (order orientation) หรืออยู่ในรูปผลึก (crystallinity) การจัดเรียงตัวลักษณะนี้จะทำให้เม็ดสตาร์ชไม่ละลายในน้ำเย็นโดยสามารถดูดน้ำเย็นและพองตัว (swelling) ได้เล็กน้อย ความสามารถในการดูดน้ำของเม็ดสตาร์ชจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เม็ดสตาร์ชจะพองตัวออกมากและมีอะมิโลสส่วนที่ละลายน้ำได้หลุดออกมาได้ด้วย ทำให้ได้ส่วนผสมของน้ำแป้งที่มีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้มากขึ้น เม็ดสตาร์ชจะพองตัวมากขึ้นจนมีขนาดใหญ่และแตกออกได้เป็นสารละลายขุ่นหนืด (starch paste) ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่ละลายได้ของอะมิโลสและบางส่วนของอะมิโลเพกทินและเรียกกระบวนการนี้ว่า เจลาติไนเซชัน (gelatinization) การเกิดเจลาติไนเซชันจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ชสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้ดีขึ้น รวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยน้ำย่อยต่างๆ ได้ดีกว่า

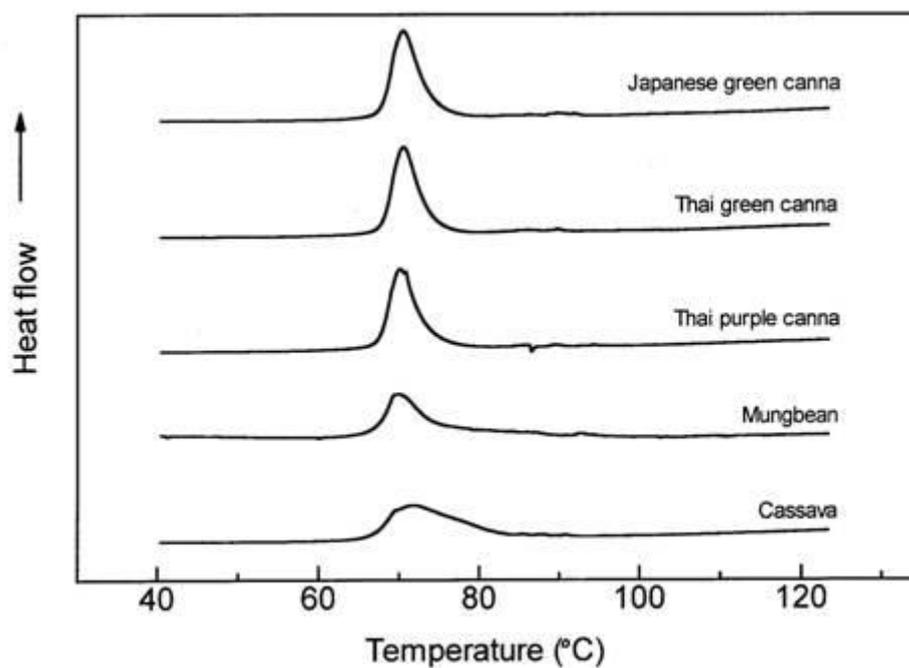
การเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดสตาร์ชแบ่งได้ 3 ระยะ แสดงดังภาพประกอบ 2.7 คือ ระยะแรกเม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างไมเซลล์ (micelles) ยึดหยุ่นได้จำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด เม็ดสตาร์ชยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ (birefringence) เมื่อใส่สารเคมีหรือเพิ่มอุณหภูมิให้สารละลายของสตาร์ชจนถึงประมาณ 65°C (อุณหภูมิแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง) เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดสตาร์ชจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างไมเซลล์ภายในเม็ดสตาร์ชจะอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามาและเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา ซึ่งถ้าเหวี่ยงแยกส่วนใสและหยดสารละลายไอโอดีนลงในส่วนใสจะเกิดสีน้ำเงินขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจล

อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลาติไนซ์ เมื่อตรวจวัดโดยเครื่องมือวัดความหนืด มักจะเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting time) ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดและองค์ประกอบของแป้ง เช่น ปริมาณไขมัน สัดส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน การจัดเรียงตัวและขนาดของเม็ดสตาร์ช เป็นต้น สำหรับความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ในระหว่างเจลาติไนซ์มี

การแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของสตาร์ช โดยพบว่าสตาร์ชของมันฝรั่งจะให้ความหนืดสูงสุดสูงที่สุด และมีความสามารถในการทำให้ข้นหนืด (thickening power) สูงด้วย ในขณะที่สตาร์ชจากข้าวโพดและข้าวสาลีจะมีความหนืดสูงสุดต่ำ เนื่องจากเม็ดสตาร์ชมีกำลังการพองตัวอยู่ในระดับปานกลาง



ภาพประกอบ 2.7 ระยะเวลาในการเกิดเจลลาทีนเซชันของเม็ดแป้ง  
ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546)



ภาพประกอบ 2.8 DSC เทอร์โมแกรมของแป้ง  
ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546)

การเกิดเจลที่ในซีไม่ได้เกิดเฉพาะอุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่งแต่เกิดเป็นช่วงอุณหภูมิประมาณ 8-12 °ซ การตรวจสอบกระบวนการเจลที่ในซีชั้น นอกจากการใช้การสังเกตการเปลี่ยนโครงสร้างการบิตระนาบแสงโพลาไรซ์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แล้ว สามารถตรวจสอบโดยเครื่องมือที่วัดและบันทึกปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการซึ่งเครื่องมือที่นิยมในปัจจุบันนี้คือเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีของวัสดุในรูปฟังก์ชันกับอุณหภูมิปกติพอลิเมอร์ต่างๆ ในรูปผลึกและอสัณฐานจะมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะได้เมื่อได้รับความร้อน สตาร์ชก็เช่นเดียวกันในสภาพที่มีน้ำน้อย เมื่อให้ความร้อนจะมีอุณหภูมิหลอมละลาย ( $T_m$ ) ที่สูงมาก กล่าวคือในช่วงของ 160-200 °ซ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมากขึ้นอุณหภูมิของการหลอมละลายก็จะลดลง เมื่อปริมาณน้ำมี 70 ส่วนหรือมากกว่า การหลอมละลายก็คือ การเกิดเจลที่ในซีชั้น ช่วงของอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลง (onset temperature) และอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (peak temperature) ของความร้อน คือ ช่วงอุณหภูมิของเจลที่ในซีชั้น สำหรับการวัดลักษณะของการเกิดเจลที่ในซีชั้นของแป้งโดยใช้เครื่อง DSC จึงทำได้โดยการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างสารผสมแป้งกับน้ำในอัตรา 30:70 จนถึงอุณหภูมิที่คาดว่าเลยช่วงในการเกิดเจลที่ในซีชั้นจะได้ Thermogram ซึ่งเป็นกราฟระหว่าง heat flow และอุณหภูมิ พลังงานที่ใช้ในการเกิด เจลที่ในซีชั้น (enthalpy, cal/g) ได้จากพื้นที่ใต้กราฟหารด้วยน้ำหนักแป้งตัวอย่าง แป้งแต่ละชนิดจะมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลที่ในซีชั้นต่างๆ กัน (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลที่ในซีชั้นแล้วให้ความร้อนต่อไป เม็ดแป้งจะพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะมีการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มี การดูดน้ำกลับเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียว คล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือการคืนตัว (setback) เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีก ลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งเรียกว่า syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะสีขาวขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น

การเกิดรีโทรเกรเดชันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา พีเอชของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะมิโลส อะมิโลเพกติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ในแป้ง ในสถานะที่อุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นของแป้งสูง แป้งสามารถคืนตัวได้ดี ในช่วงพีเอช 5-7 แป้งสามารถคืนตัวได้เร็วที่สุด สำหรับช่วงพีเอชที่สูงหรือต่ำกว่านี้แป้งจะคืนตัวได้ช้าลง การชะลอการคืนตัวของแป้งจะใช้เกลือที่มีประจุลบและบวก (monovalent anion และ cation) แคลเซียมไนเตรท (calcium nitrate) และยูเรีย (urea)

ปริมาณและขนาดของอะมิโลสมีความสำคัญต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง แป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ อัตราในการเกิดรีโทรเกรเดชันจะสูงสุด (การละลายต่ำที่สุด) เมื่อขนาดโมเลกุล (degree of polymerization) ของ

อะมิโลสเท่ากับ 100-200 อัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันจะลดลงเมื่อโมเลกุลของอะมิโลสยาวหรือสั้นกว่านี้ ในการทำให้อะมิโลสที่เกิดรีโทรเกรเดชันกลับมาละลายได้อีกครั้งหนึ่งต้องใช้อุณหภูมิ 100-160°C อะมิโลเพกตินจะมีผลทำให้เกิดรีโทรเกรเดชันได้น้อยมาก ดังนั้นแป้งสตาร์ชแต่ละชนิดจะมีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันที่แตกต่างกัน ในแป้งข้าวโพดเหนียวจะมีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชต่ำที่สุด เนื่องจากไม่มีอะมิโลสในสตาร์ช สำหรับแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีจะมีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันสูงกว่า แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากมีปริมาณอะมิโลสสูง (ประมาณร้อยละ 28) มีโมเลกุลของอะมิโลสเล็กและมีไขมันในปริมาณสูงทำให้เกิดการจับตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน (amylase-lipid complex) (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

## 2.4 ประเภทของแป้ง

เมื่อพิจารณาในเชิงคุณค่าทางอาหารของแป้งสตาร์ช (nutritional starch, dietary starch) ทำให้แบ่งแป้งสตาร์ชออกได้เป็น 3 ประเภท ตามอัตราและระยะเวลาในการย่อย (Englyst and Hudson, 1992) ได้แก่ แป้งสตาร์ชที่สามารถถูกย่อยได้อย่างรวดเร็ว (rapidly digestible starch, RDS) แป้งสตาร์ชที่สามารถถูกย่อยได้อย่างช้าๆ (slowly digestible starch, SDS) และแป้งสตาร์ชทนย่อยต่อเอนไซม์ (resistant starch, RS)

### 2.4.1 แป้งที่สามารถถูกย่อยได้อย่างรวดเร็ว (rapidly digestible starch, RDS)

โครงสร้างหลักของ RDS โดยทั่วไปจะเป็นส่วนอสัณฐาน (amorphous) และ dispersed starch (Sajirata *et al.*, 2006) ซึ่งจะถูกละลายโดยเอนไซม์ได้อย่างรวดเร็วไปเป็นน้ำตาลกลูโคสภายใน 20 นาที และพบได้ทั่วไปในอาหารที่มีส่วนประกอบของแป้งที่ผ่านการหุงสุกใหม่ ๆ

### 2.4.2 แป้งที่สามารถถูกย่อยได้อย่างช้าๆ (slowly digestible starch, SDS)

SDS จะมีลักษณะคล้ายกับ RDS แต่จะถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ได้ช้ากว่า และคาดว่า จะถูกย่อยสลายได้สมบูรณ์ในลำไส้เล็ก โดยสามารถตรวจวัดปริมาณได้โดยใช้วิธีทางเคมี ซึ่งจะเป็นส่วนที่ถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ไปเป็นน้ำตาลกลูโคสหลังจากการย่อย 100 นาที พบได้ในแป้งสตาร์ชธรรมชาติดิบ (raw native starch) ที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A และ C เช่น แป้งสตาร์ชจากพืชธัญชาติ และผลิตภัณฑ์เส้นที่ทำสุกแล้ว เป็นต้น (Sajirata *et al.*, 2006) และเนื่องจาก SDS ถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์อย่างช้าๆ ดังนั้นจึงส่งผลให้มีระดับน้ำตาลกลูโคสในเลือดเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งจะเป็นผลดีสำหรับผู้ป่วยที่เป็นโรคเบาหวาน นอกจากนี้ยังพบว่าอาหารที่มีปริมาณ SDS สูงจะมีค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index, GI) ปานกลาง (Lehmann and Robin, 2007) ซึ่งมีข้อมูลทางการแพทย์ที่แสดงว่าอาหารที่มีค่า GI ต่ำ จะลดโอกาสเสี่ยงต่อการเป็นโรคเบาหวานและโรคหลอดเลือดหัวใจตีบ (Jenkins *et al.*, 2002)

### 2.4.3 แป้งทนต่อการย่อย (resistant starch, RS)

แป้งทนต่อการย่อยเป็นส่วนเล็กๆ ของแป้งสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์  $\alpha$ -amylase และ pullulanase ได้ 120 นาที (Englyst and Hudson, 1992) ดังนั้นแป้งทนต่อการ

ย่อยจึงเป็น dietary starch ที่ทนต่อการย่อยในลำไส้เล็ก ซึ่งจะผ่านไปถึงลำไส้ใหญ่และถูกหมักโดย จุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ (Euresta, 1992)

## 2.5 แป้งทนต่อการย่อย (resistant starch, RS)

### 2.5.1 ความหมายของแป้งทนต่อการย่อย

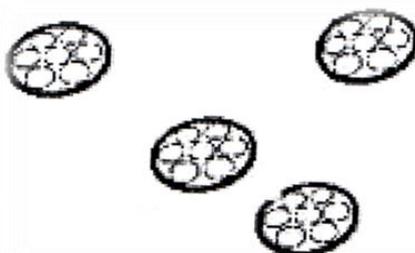
Resistant starch (RS) หรือแป้งที่ไม่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์ (enzyme Resistant starch) หมายถึง แป้งและผลิตภัณฑ์ของแป้งที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์และดูดซึมภายใน ลำไส้เล็กของมนุษย์ได้ โครงสร้างโมเลกุลแป้งทนต่อการย่อยมีความทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์  $\alpha$ -1,4 amylase ที่มีในลำไส้เล็ก จึงมีคุณสมบัติต่อสุขภาพเช่นเดียวกับเส้นใยอาหาร (dietary fiber) และพรีไบโอติก โดยแป้งทนต่อการย่อยที่ไม่ย่อยสลายในลำไส้เล็กผ่านมาถึงส่วนลำไส้ใหญ่และถูกหมัก โดยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ให้ได้กรดไขมันสายสั้นๆ (short chain fatty acid) กรดไขมันเหล่านี้มีผลดีต่อ ผู้บริโภค ช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค นอกจากนี้ยังสามารถดูดซึมภายในลำไส้ ใหญ่และขนส่งไปถึงตับได้ กรดไขมันที่เกิดขึ้นมีบทบาทในการป้องกันโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่ได้ การเพิ่ม ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยในอาหารที่บริโภคเข้าไปจะทำให้ระบบขับถ่ายทำงานได้ดีขึ้น ช่วยลดความ เสี่ยงต่อการเกิดโรคท้องผูก และโรคน้ำลำไส้อักเสบ นอกจากนี้การบริโภคแป้งทนต่อการย่อยยังช่วย ป้องกันหรือลดภาวะโรคอ้วน ลดความเสี่ยงในการเกิดเบาหวาน และมีบทบาทในการลดปริมาณน้ำตาล และคอเลสเตอรอลในเลือด ลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคไขมันอุดตันในเส้นเลือดและ โรคหัวใจ

### 2.5.2 ประเภทแป้งทนต่อการย่อย

แป้งทนต่อการย่อยมีอยู่ตามธรรมชาติ เช่น ถั่ว ข้าว กล่ำย มันสำปะหลัง เผือก มันไข่ (มัน มีอเสื่อ) กล่ำยดิบ เป็นต้น สามารถแบ่งแป้งทนต่อการย่อยออกเป็น 4 ประเภทได้แก่

#### 1. Physically Indigestible Starch (RS type I)

แป้งทนต่อการย่อย ชนิดที่ 1 เป็นแป้งที่มีลักษณะทางกายภาพขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ เม็ดแป้ง อยู่ใน amyloplast ของวัตถุดิบ เอนไซม์จึงไม่สามารถย่อยแป้งในส่วนนี้ได้ เพราะมีโครงสร้างที่ถูกห่อหุ้ม ด้วยผนังเซลล์ที่แข็งแรง แต่ถ้าผนังเซลล์ถูกทำลายด้วยการบดหรือเคี้ยว จะทำให้เอนไซม์สามารถย่อย แป้งในส่วนนี้ได้ พบในเมล็ดธัญพืช เช่น พืชตระกูลถั่ว (legumes) และผัก เป็นต้น มีลักษณะโครงสร้าง ดังภาพประกอบ 2.9



ภาพประกอบ 2.9 ลักษณะของแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 1

ที่มา: Sajilata et al (2006)

ตาราง 2.4 ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยในอาหาร

ตัวอย่างอาหารแป้ง	แป้งทั้งหมด (%)	แป้งที่ย่อยได้ (%)	RS (%)
<b>ข้าวและผลิตภัณฑ์</b>			
ข้าวเสาไห้, ขัดสี (อะมิโลสสูง)	52.0 ± 3.2	17.2 ± 4.5	34.8 ± 1.4
ข้าวหอมมะลิ, ขัดสี (อะมิโลสต่ำ)	67.5 ± 13.9	55.9 ± 16.7	11.6 ± 2.8
ข้าวกล้อง, ดิบ	66.6 ± 2.5	62.3 ± 2.5	4.2 ± 0.0
ข้าวขาวหุงสุก	64.7 ± 1.6	57.6 ± 1.6	7.1 ± 0.0
ขนมจีน ชนิดหมัก	41.9 ± 0.0	33.3 ± 1.7	8.5 ± 1.1
ข้าวตัง, แห้ง	4.7 ± 0.1	3.2 ± 0.0	1.5 ± 0.0
ข้าวตัง, ทอด	75.9 ± 0.5	73.2 ± 0.5	2.6 ± 0.0
ข้าวเกรียบว่าว, แห้ง	28.4 ± 5.9	28.1 ± 5.9	0.3 ± 0.0
ข้าวเกรียบว่าว, ปรุง	54.6 ± 0.0	52.6 ± 0.1	2.9 ± 0.3
ข้าวเกรียบ, แห้ง	44.2 ± 0.0	42.1 ± 0.2	2.2 ± 0.3
ข้าวเกรียบ, ทอด	44.9 ± 0.8	42.9 ± 0.6	2.0 ± 0.1
สแน็คข้าว, extrusion cooking	4.2 ± 0.1	3.9 ± 0.0	0.4 ± 0.0
<b>ผลิตภัณฑ์เส้น ชนิดแห้ง</b>			
วุ้นเส้น	59.0 ± 0.9	47.7 ± 0.6	11.3 ± 1.5
วุ้นเส้น, กึ่งสำเร็จรูป	60.7 ± 0.3	51.7 ± 1.1	9.1 ± 0.8
เส้นเล็ก, ข้าวขาว	67.0 ± 3.7	64.0 ± 4.1	3.0 ± 0.4
เส้นเล็ก, กึ่งสำเร็จรูป	57.1 ± 0.0	54.7 ± 0.1	2.4 ± 0.1
เส้นหมี่	58.5 ± 1.6	54.1 ± 0.4	4.4 ± 1.2
แผ่นแป้งข้าว	41.3 ± 0.4	38.9 ± 0.5	2.4 ± 0.0
<b>ถั่วต่างๆ</b>			
ถั่วเขียว	44.3 ± 2.0	21.4 ± 2.0	22.9 ± 0.0
สตาร์ชถั่วเขียว, ทางการค้า	99.1 ± 3.9	94.1 ± 3.8	5.0 ± 0.1
ถั่วดำ	39.8 ± 5.4	21.5 ± 5.2	18.3 ± 0.2
ถั่วแดง เม็ดเล็ก	40.2 ± 0.1	23.2 ± 0.6	17.0 ± 0.5
ถั่วแดงหลวง	33.5 ± 3.2	23.2 ± 4.4	10.3 ± 1.2
<b>อื่นๆ</b>			
ลูกเดือย	66.5 ± 0.6	60.1 ± 0.6	6.4 ± 0.0
สาคุ (แป้งมันสำปะหลัง)	44.7 ± 0.2	40.1 ± 1.2	4.5 ± 1.0
แป้งมันสำปะหลังดิบ, ทางการค้า	94.6 ± 0.3	50.0 ± 0.0	44.6 ± 0.3
แป้งมันสำปะหลังทางการค้า, สุก 50%	5.7 ± 0.1	3.5 ± 0.1	2.2 ± 0.0
วีซีเอสแทนท์สตาร์ชทางการค้า	77.6 ± 0.1	19.1 ± 0.0	58.5 ± 0.0

## 2. Resistant Starch Granules (RS type II)

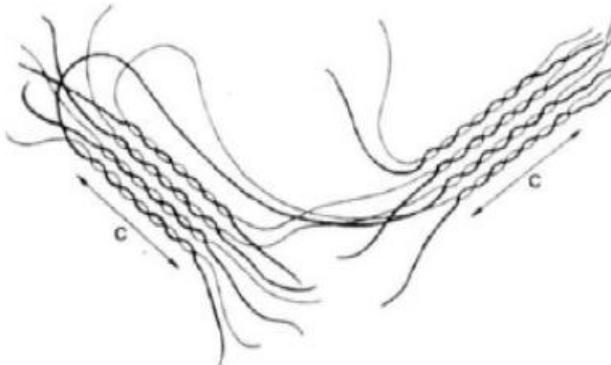
แป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 2 เป็นแป้งที่มีเม็ดแป้งดิบทนต่อการทำงานของเอนไซม์ (raw or ungelatinized starches) พบในแป้งที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทำให้แป้งสุก เช่น เม็ดแป้งกล้วยดิบ เม็ดแป้งมันฝรั่งดิบ และแป้งอะมิโลสสูง มีลักษณะโครงสร้างดังภาพที่ 2.10 โดยกล้วยที่อยู่ในรูปของผงแป้งจะมีปริมาณของแป้งที่ทนต่อการย่อยสลายด้วยเอนไซม์สูงถึงร้อยละ 52.1 (โดยน้ำหนักแห้ง) ทำให้เอนไซม์อะไมเลสไม่สามารถย่อยได้และไม่เกิดเจลาทีน



ภาพประกอบ 2.10 ลักษณะของแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 2  
ที่มา: Sajilata *et al.* (2006)

## 3. Retrograded Starch (RS type III)

แป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 เป็นแป้งที่เกิดการคืนตัวเป็นประเภทแป้งคืนตัว (retrograded starch) ส่วนใหญ่แป้งชนิดนี้พบในอาหารที่ให้ความร้อนจนเกิดเจลาทีนซ์ เมื่อถูกทำให้เย็นลงจะเกิดการจัดเรียงตัวของอะมิโลสใหม่โดยสายของอะมิโลสจะจับกันแน่นแล้วทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายที่มีความแข็งแรงมากและสามารถทนต่อการย่อยของเอนไซม์ได้ มีลักษณะโครงสร้างดังภาพประกอบ 2.11

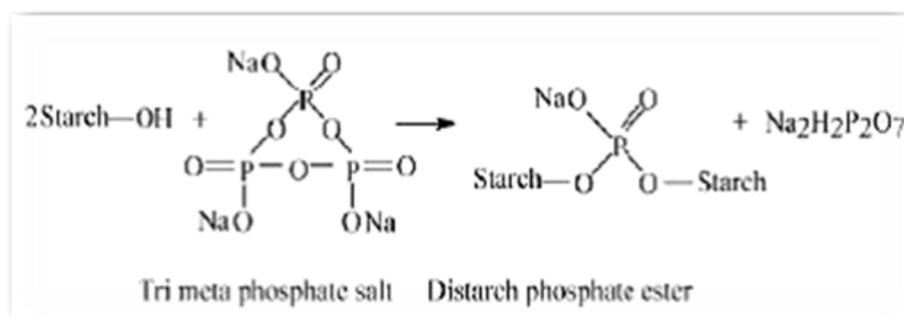


ภาพประกอบ 2.11 ลักษณะของแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3  
ที่มา: Sajilata *et al.* (2006)

## 4. Modified Starch (RS type IV)

แป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 4 เป็นแป้งดัดแปรโดยใช้สารเคมีหรืออุณหภูมิ ทำให้แป้งทนต่อการย่อยของเอนไซม์ เนื่องจากการเกิดโครงสร้าง glycosidic bond ที่ไม่ใช่  $\alpha$ -1,4 และ  $\alpha$ -1,6

ดังเช่นการใช้สารเคมีเกิดปฏิกิริยา Substituent หรือ Cross-link และการใช้ความร้อนเกิดปฏิกิริยา Caramelization หรือ Maillard จากการตัดแปรรูปโดยใช้สารเคมีทำให้แบ่งทนต่อการย่อยของเอนไซม์ที่เกิดจากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยา Substituent หรือ Cross-link มีลักษณะโครงสร้างดังภาพประกอบ 2.12



ภาพประกอบ 2.12 ลักษณะของแบ่งทนต่อการย่อยชนิดที่ 4  
ที่มา: Sajilata *et al.* (2006)

### 2.5.3 ประโยชน์ของแบ่งทนต่อการย่อย

#### 2.5.3.1 เป็นเส้นใยอาหาร (Dietary fiber)

แบ่งทนต่อการย่อยเป็นแบ่งทนต่อการย่อยของเอนไซม์ จึงจัดเป็นเส้นใยชนิดหนึ่ง สามารถใช้การวิเคราะห์แบบเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber) โดยใช้วิธี AACCC (2000) ได้ และมีคุณสมบัติทางด้านสรีรวิทยาเหมือนเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำ (soluble dietary fiber) คือ ทำให้ระดับการย่อย และการเผาผลาญกลูโคสได้ช้าลง ซึ่งส่งผลดีต่อลำไส้ใหญ่ ลดคอเลสเตอรอล และไตรกลีเซอไรด์ในเลือด

#### 2.5.3.2 ลดระดับน้ำตาลในเลือด

แบ่งทนต่อการย่อยมีผลต่อระดับน้ำตาลในเลือด พบว่า แบ่งทนต่อการย่อยจะเกิดการย่อยภายหลังการบริโภคแล้ว 5-7 ชั่วโมง ทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดและอินซูลินหลังบริโภคอาหารลดลง สำหรับแบ่งที่ผ่านการให้ความร้อนจะเกิดการย่อยทันทีหลังบริโภคทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดและอินซูลินหลังบริโภคอาหารเพิ่มขึ้น (Roben *et al.*, 1994) การศึกษาโดยใช้แบ่งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 ผลิตโดยบริษัท CrystaLean นำมาใช้เป็นส่วนผสมในอาหาร พบว่าระดับน้ำตาลกลูโคสในเลือดของผู้ทดสอบภายหลังการบริโภคอาหารมีค่าต่ำกว่าการบริโภคคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่นๆ เช่น แบ่งชนิดอื่นๆ ได้แก่ โอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharides) และน้ำตาล เป็นต้น โดย แบ่งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 อาจมีบทบาทควบคุมโรคเบาหวาน

#### 2.5.3.3 เป็นสารพรีไบโอติก (Prebiotic)

แบ่งทนต่อการย่อยไม่ถูกย่อยสลายในลำไส้เล็กแต่เกิดการหมักโดยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ และผลิตกรดไขมันสายสั้นๆ เช่น แอซิเทต (acetate) บิวทิเรต (butyrate) และโพรพิโอเนต

(propionate) ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อจุลินทรีย์ ที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายของมนุษย์ (probiotic microorganisms) เช่น *Bifidobacterium* เป็นต้น (Sajilata *et al.*, 2006)

#### 2.5.3.4 ยับยั้งการสะสมไขมัน และลดการสะสมคอเลสเตอรอล

ยับยั้งการสะสมไขมัน Higgins และคณะ (2004) ทำการศึกษาโดยใช้ผู้ทดสอบเพศชาย จำนวน 12 คน ให้บริโภคอาหารที่มีการเติมเส้นใยจาก แป้งทนต่อการย่อย เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหาร พบว่า แป้งทนต่อการย่อย ช่วยลดการสะสมของไขมัน เนื่องจากภายหลังการบริโภคเกิดการออกซิเดชันของลิพิด (lipid oxidation) เพิ่มขึ้น

#### 2.5.3.5 ป้องกันการเกิดมะเร็งลำไส้ใหญ่

บทบาทของแป้งทนต่อการย่อยในการป้องกันการเกิดมะเร็งลำไส้ใหญ่ โดยกรดไขมันที่เกิดขึ้นจากการหมักของจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่จะช่วยเพิ่มปริมาณของของเหลวและปรับค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ภายในลำไส้ให้ต่ำลง เมื่อเกิดสภาวะกรดขึ้นภายในบริเวณลำไส้ใหญ่จะเกิดการยับยั้งเอนไซม์จากจุลินทรีย์บางชนิดที่สามารถเปลี่ยนน้ำดีให้เกิดเป็นสารก่อมะเร็งในลำไส้ใหญ่ การที่จุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่สามารถย่อยสลายเส้นใยอาหารได้ จึงมีการแบ่งตัวเพิ่มจำนวนซึ่งช่วยเพิ่มปริมาณอุจจาระกระตุ้นให้เกิดการขับถ่าย ป้องกันการเกิดมะเร็งในลำไส้ใหญ่ (มลศิริ วิโรทัย, 2545) กรดไขมันบิวทิเรตยังช่วยปรับสภาวะตอนปลายของลำไส้ใหญ่ให้สมบูรณ์ด้วย (Alexander, 1995; Ferguson *et al.*, 2000)

#### 2.5.3.6 การดูดซึมแร่ธาตุ

การดูดซึมแร่ธาตุที่ลำไส้ จากงานวิจัยของ Morais และคณะ (1996) ที่ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลของแป้ง 2 ชนิดได้แก่ แป้งที่มีส่วนผสมของแป้งทนต่อการย่อยร้อยละ 16.4 และแป้งที่ไม่ได้ผสมโดยตรวจสอบผลต่อการดูดซึมของแคลเซียมฟอสฟอรัส เหล็ก และสังกะสี พบว่า แป้งที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ มีผลต่อการดูดซึมแคลเซียมและเหล็กของลำไส้

#### 2.5.3.7 ช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์

จากคุณสมบัติของที่มีสีขาวขนาดอนุภาคเล็กและมีกลิ่นอ่อนจึงมีประโยชน์หลากหลายในผลิตภัณฑ์อาหารประเภทเส้นใยอาหารสูง โดยการช่วยปรับปรุงให้อาหารเส้นใยอาหารสูงมีคุณภาพและการยอมรับของผู้บริโภคใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์อาหารสูตรปกติหรือสูตรทั่วไป โดยการช่วยปรับปรุงการขยายตัวในผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการของแป้งทนต่อการย่อยอัดพอง เช่น อาหารเข้าที่ทำจากธัญพืช และช่วยในการปรับปรุงปริมาตร เนื้อสัมผัสและกลิ่นรสในผลิตภัณฑ์ขนมอบเส้นใยอาหารสูงได้แก่ ขนมปัง เค้ก และคุกกี้ เป็นต้น

### 2.5.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดแป้งทนต่อการย่อย

#### 2.5.4.1. คุณสมบัติของแป้ง

- 1) โครงสร้างของเม็ดแป้ง โดยโครงสร้างที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเข้าถึงของเอนไซม์ แป้งที่มีโครงสร้างทางกายภาพแบบปิด ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าไปย่อยได้
- 2) โครงสร้างโมเลกุลของแป้ง โดยโครงสร้างที่เป็นผลึกเรียงตัวกันแน่นจะทำให้เกิดการทนทานต่อการย่อยของเอนไซม์

3) อัตราส่วนของอะมิโลสและแอมิโลเพคติน โดยแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูงทำให้เกิดแป้งทนต่อการย่อยได้มาก ซึ่งการคืนตัวของอะมิโลสขึ้นอยู่กับจำนวนของอะมิโลสที่มีอยู่ระหว่างการเก็บแป้งหลังผ่านการเจลาติไนซ์ โดยแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะเกิดการคืนตัวในรูปของโครงสร้างผลึกที่ทนทานต่อการย่อยโดยเอนไซม์อะไมเลส (Sievert and Pomeranz, 1989)

4) ความยาวของสายอะมิโลส อัตราการคืนตัวของแป้งจะเกิดสูงสุดเมื่อขนาดโมเลกุล (degree of polymerization) ของอะมิโลสเท่ากับ 100 ถึง 200 และอัตราการคืนตัวจะลดลงเมื่อโมเลกุลของสายอะมิโลสยาวหรือสั้นกว่านี้

#### 2.5.4.2 ความร้อนและความชื้น

ปริมาณน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดแป้งทนต่อการย่อยโดยการให้ความร้อนกับน้ำแป้งหลายรอบ ลดการเกิดไฮโดรไลซิสของเอนไซม์อะไมเลส (pancreatic amylase) และเพิ่มการเกิดแป้งทนต่อการย่อยที่มากที่สุดได้จากการใช้อัตราส่วนแป้งต่อน้ำเป็น 1 ต่อ 3.5 (w/w) ในการให้ความร้อนโดยการใช้หม้อนึ่งความดัน

#### 2.5.4.3 การเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ของแป้งกับองค์ประกอบอื่น

1) โปรตีนทำให้เกิดแป้งทนต่อการย่อยลดลงดังที่ได้ทดสอบในแป้งมันฝรั่งที่มีการเติมโปรตีน

2) ไขมันมีผลต่อการเกิดแป้งทนต่อการย่อยโดยการสกัดไขมันออกจากแป้งทำให้ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยเพิ่มขึ้น และเมื่อเติมไขมันในแป้งข้าวสาลีและแป้ง amylo maize VII พบว่าปริมาณแป้งทนต่อการย่อยลดลงเนื่องจากไขมันมีความสามารถในการจับตัวกับอะมิโลสเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับไขมัน

3) ไอออน (ประจุบวก) มีผลต่อการเกิดแป้งทนต่อการย่อย เช่น เมื่อมีแคลเซียมและโพแทสเซียมไอออน จะทำให้ปริมาณของแป้งทนต่อการย่อยในเจลแป้งมันฝรั่งลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม เนื่องจากการยับยั้งการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างอะมิโลสและแอมิโลเพคติน เมื่อมีการดูดซึมน้ำไอออนเหล่านี้ไว้ (Escarpa *et al.*, 1997)

4) น้ำตาล มีผลต่อการเกิดแป้งทนต่อการย่อย โดยการเติมน้ำตาลที่ละลายได้ เช่น กลูโคส มอลโตส ซูโครส และไรโบส พบว่าระดับการเกิดโครงสร้างผลึกลดลง และทำให้ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยลดลง เนื่องจากน้ำตาลทำให้การดูดซึมน้ำและการพองตัวของแป้งเปลี่ยนไป มีผลต่อการสุกของแป้ง (Sajilata *et al.*, 2006)

#### 2.5.4.4 สภาวะในกระบวนการผลิต

การให้ความร้อน มีผลต่อการสุกของแป้ง สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การทำให้สุกด้วยไอน้ำ วิธีการใช้หม้อนึ่งความดัน (autoclave) การต้มกึ่งดิบกึ่ง การอบ และการอัดพอง

สภาวะในการเก็บมีผลต่อการคืนตัว (retrogradation) ของแป้งปริมาณแป้งทนต่อการย่อยเพิ่มขึ้นได้ในขั้นตอนการเก็บโดยเฉพาะการเก็บที่อุณหภูมิต่ำ การเพิ่มขึ้นของแป้งทนต่อการย่อยในตัวอย่างแป้งที่ผ่านการเจลาติไนซ์และเก็บที่อุณหภูมิต่ำพบว่า มีปริมาณแป้งทนต่อการย่อยเพิ่มขึ้นร้อยละ 27 เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 4°C ข้าวที่เก็บที่ -20°C มีการคืนตัว มากกว่าข้าวที่เก็บที่อุณหภูมิตู้เย็น

การเก็บแป้งข้าวสาลีที่ผ่านการเจลาติไนซ์แล้วที่อุณหภูมิตู้เย็นนานขึ้นพบว่าเกิดการเกิดแป้งทนต่อการย่อยมากขึ้น (Sijilata *et al.*, 2006)

## 2.6 วิธีการผลิตแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3

การเกิดแป้งทนต่อการย่อยนอกจากสามารถที่จะเกิดขึ้นตามธรรมชาติได้ในอาหารแล้ว (เกี๋ยกูด ปิยะจอมขวัญ และ กล้าณรงค์ ศรีรอด, 2544) ยังสามารถเตรียมได้จากการดัดแปรแป้งโดยวิธีการต่างๆดังนี้

### 1. การทำให้เกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง

วิธีการนี้ทำโดยการให้ความร้อนแก่น้ำแป้งเพื่อให้แป้งสุก แล้วทิ้งให้น้ำแป้งเย็นตัวลง โมเลกุลของแป้งที่ละลายออกมาทำให้เกิดการเรียงตัวใหม่ได้เป็นผลึกแป้งที่แข็งแรง และสามารถถูกย่อยได้ด้วยเอนไซม์น้อยลง ซึ่งอาจทำการย่อยของโครงสร้างที่ไม่เป็นผลึกอีกด้วยเอนไซม์หรือกรด เพื่อลดปริมาณการย่อยของเอนไซม์ นิยมใช้กับแป้งที่มีอะมิโลสสูง

### 2. การใช้เอนไซม์ในการย่อยแป้ง

การย่อยแป้งเพื่อช่วยเพิ่มอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันโดยการใช้เอนไซม์ เช่น amylase ทำให้ขนาดโมเลกุลของแป้งลดลงเป็น Maltodextrin ชนิดที่มีขนาดการย่อยต่ำ การใช้เอนไซม์ที่ตัดกิ่งก้าน เป็นการเพิ่มศักยภาพในการเตรียมแป้งทนต่อการย่อยจากแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ

### 3. การใช้กระบวนการความร้อนชื้น (Heat-moisture treatment)

เป็นการเตรียมแป้งทนต่อการย่อยของเม็ดแป้งที่ยังไม่ผ่านการทำให้สุกและมีความชื้นประมาณร้อยละ 20-45 นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90-120°ซ เป็นเวลาประมาณ 1-4 ชั่วโมง มีผลทำให้เม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลงและจัดเรียงโครงสร้างภายในที่ทนทานต่อการย่อยของเอนไซม์ได้มากขึ้น

### 4. การใช้สารเคมีในการทำแป้งดัดแปร

เช่น แป้ง acetylated แป้ง hydroxypropylated และแป้ง cross-linked เป็นต้น แป้งทนต่อการย่อยสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติแต่เป็นส่วนน้อยและพบในพืชบางชนิดเท่านั้น ซึ่งเป็นแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 1 และ 2 ส่วนการใช้ความร้อนและการใช้ความร้อนร่วมกับเอนไซม์เพื่อให้แป้งสุกและเกิดการคืนตัว ทำให้เกิดแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 และการใช้สารเคมีเพื่อดัดแปลงโครงสร้างโมเลกุลแป้งทำให้เกิดแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 4

ในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีการทำให้เกิดแป้งทนต่อการย่อยโดยการใช้ความร้อนแบบต่างๆ และการใช้ความร้อนร่วมกับเอนไซม์

#### 2.6.1 การเกิดแป้งทนต่อการย่อยโดยการใช้ความร้อน

การให้ความร้อนกับแป้งจะเหนี่ยวนำให้เกิดแป้งทนต่อการย่อยขึ้นโดยการทำให้แป้งสุกเหนืออุณหภูมิที่ทำให้เกิดเจลาติไนเซชัน การทำให้แป้งสุกสามารถทำได้หลายวิธีแต่วิธีที่นิยมใช้ในการทำให้เกิดแป้งทนต่อการย่อย คือ การใช้หม้อนึ่งความดัน (autoclave) และการอัดพอง (extrusion)

2.6.1.1 การใช้หม้อนึ่งความดัน (autoclave) ผลจากการใช้หม้อนึ่งความดัน ทำให้แป้งทนต่อการย่อยเพิ่มขึ้น Siljestrom and Asp (1985) ได้ศึกษาแป้งสาลีที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยหม้อ

นี้ถึงความดันแล้ว พบว่า มีปริมาณแป้งทนต่อการย่อยร้อยละ 9 เมื่อเทียบกับแป้งสาลีที่ไม่ผ่านการทำให้สุก ซึ่งมีปริมาณแป้งทนต่อการย่อยน้อยกว่าร้อยละ 1 เปอร์เซ็นต์ Onyango *et al.* (2006) ศึกษาอิทธิพลของเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มต่อการเกิดแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 จากการให้ความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งความดันและการย่อยด้วยกรดในแป้งมันสำปะหลัง เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแป้งทนต่อการย่อยในแป้งมันสำปะหลัง (ร้อยละ 0.44) พบว่าการใช้หม้อนึ่งความดันและการย่อยด้วยกรดทำให้มีปริมาณแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 เพิ่มขึ้น โดยเมื่อใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายมีปริมาณมากที่สุดเมื่อบ่มไว้ที่อุณหภูมิ 100°ซ 48 ชั่วโมง (ร้อยละ 9.68) และในกรดแลคติกให้ปริมาณมากที่สุดเมื่อบ่มไว้ที่อุณหภูมิ 60°ซ เวลา 48 ชั่วโมง (ร้อยละ 9.97) ดังตาราง 2.5

ตาราง 2.5 ผลของสารละลายและสภาวะการบ่มในการผลิตของแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 จากแป้งมันสำปะหลัง

สภาวะการบ่ม อุณหภูมิ (°ซ)	เวลา (ชม)	แป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 (g/100 g dry matter)			
		น้ำ	กรดแลคติก (mmol/L)		
			1	10	100
-20	6	3.02	3.94	2.68	1.70
	24	3.79	4.43	5.00	1.43
	48	4.78	3.82	6.75	1.99
4	6	5.23	4.54	3.73	1.89
	24	5.07	8.01	8.08	1.39
	48	6.50	6.89	9.12	1.43
30	6	4.80	3.87	7.20	2.04
	24	5.93	5.54	8.48	2.42
	48	5.61	6.09	8.54	1.93
60	6	3.49	3.76	7.29	1.61
	24	4.96	5.71	9.89	1.65
	48	6.04	5.75	9.97	1.38
100	6	1.74	4.18	1.74	0.59
	24	9.47	8.12	4.28	0.78
	48	9.68	6.94	7.66	0.99

ที่มา: Onyango และคณะ (2006)

Sievert and Pomeranz (1989) ศึกษาการเกิดแป้งทนต่อการย่อยจากการใช้หม้อนึ่งความดัน (autoclave) โดยใช้อัตราส่วนของแป้งต่อน้ำเป็น 1 ต่อ 3.5 และ 1 ต่อ 10 ให้ความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งความดันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 121 134 และ 148°C ทั้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างในที่เย็นโดยเก็บที่อุณหภูมิ 4°C 24 ชั่วโมง ให้ความร้อนและทำให้เย็น (autoclave-cooling) ซ้ำถึง 20 รอบ และทำให้แห้งโดยใช้วิธีการอบแห้งแบบระเหิด (Freeze-dry) พบว่าการใช้อัตราส่วนแป้งต่อน้ำ 1 ต่อ 3.5 ทำให้เกิดแป้งทนต่อการย่อยได้สูงกว่าเมื่อใช้อัตราส่วนแป้งต่อน้ำเป็น 1 ต่อ 10 เนื่องจากปริมาณน้ำที่มากเกินไปทำให้สารละลายเจือจางส่วนอุณหภูมิที่ใช้ที่ 121 และ 134°C ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยแต่เมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยลดลง อาจเป็นเพราะที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการทำลายโครงสร้างของ retrograded amylose ได้ ปริมาณแป้งทนต่อการย่อย ที่ได้จากการใช้อัตราส่วนแป้งต่อน้ำเป็น 1 ต่อ 3.5 และอุณหภูมิในหม้อนึ่งความดัน 121°C แสดงในตาราง 2.6

ตาราง 2.6 ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยในแป้งชนิดต่างๆ หลังการใช้หม้อนึ่งความดันที่ 121°C โดยใช้อัตราส่วนแป้งต่อน้ำ 1 ต่อ 3.5

ชนิดแป้ง	ปริมาณอะมิโลส (ร้อยละ)	ปริมาณแป้งทนต่อการย่อย (ร้อยละ)
Amylomaize VII	70	21.3+0.3
Amylomaize V	53	17.8+0.2
Pea starch	33	10.5+0.1
Wheat starch	25	7.8+0.2
Maize starch	26	7.0+0.1
Potato starch	20	4.4+0.1
Waxy maize	<1	2.5+0.2

ที่มา: Sievert and Pomeranz (1989)

Escarpa และคณะ (1996) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดแป้งทนต่อการย่อยโดยใช้หม้อนึ่งความดันสูง (High-pressure autoclave, HPA) ในแป้งมันฝรั่ง พบว่าการใช้ HPA ที่ความดัน 2 บาร์ อุณหภูมิ 115-136°C 20 นาที ทำให้มีปริมาณแป้งทนต่อการย่อย (ร้อยละ 18.16) สูงกว่าที่ได้จากการต้มในอ่างน้ำเดือด (water bath) ที่อุณหภูมิ 100°C 1 ชั่วโมง (ร้อยละ 11.06) แป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูงกว่าจะมีปริมาณแป้งทนต่อการย่อยมากกว่า

จำนวนรอบในการให้ความร้อน และทำให้เย็นเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มจำนวนรอบถึง 20 รอบ ทำให้ปริมาณของแป้งทนต่อการย่อย เพิ่มขึ้นร้อยละ 20-40 ส่วน Szczodrak and Pomeranz (1991) ทำการศึกษาการเกิดแป้งทนต่อการย่อย โดยดัดแปลงวิธีของ Sievert and Pomeranz (1989) ใช้อัตราส่วนแป้งต่อน้ำ 1:5 ให้ความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งความดันที่

อุณหภูมิ 121°ซ เวลา 1 ชั่วโมง และทำให้เย็นที่ 4°ซ ข้ามคืน จากนั้นทำแห้งด้วยการทำแห้งแบบสุญญากาศ (vacuum dry) พบว่าการเกิดแป้งทนต่อการย่อยจากแป้งข้าวบาร์เลย์มีอิทธิพลจากจำนวนรอบที่ใช้ในการให้ความร้อนและทำให้เย็น (autoclaving-cooling cycle)

Garcia-Alonso และคณะ (1999) ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยบางตัวที่มีผลเกี่ยวเนื่องในการสุกและการคืนตัวของแป้ง วัตถุประสงค์ที่ใช้คือ แป้งสาลี แป้งข้าวโพด แป้งข้าว และแป้งมันฝรั่งที่เป็นแบบสตาร์ช (starch) และแป้ง (flour) ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการสุกของแป้ง ได้แก่ วิธีการทำให้แป้งสุก การคนระหว่างการสุก และพีเอช พบว่าการทำให้สุกด้วยการใช้หม้อนึ่งความดันความดันสูง (high pressure autoclave) และการต้มในอ่างน้ำเดือด (water bath) และการคนระหว่างการทำให้สุกในหม้อนึ่งความดันความดันสูง ทำให้เกิดแป้งทนต่อการย่อยไม่แตกต่างกันในทุกตัวอย่างแป้ง ส่วนพีเอชที่ศึกษาอยู่ในช่วง 3.5-10.5 ไม่มีผลต่อการเกิดแป้งทนต่อการย่อยในแป้งสาลี แป้งข้าว และแป้งมันฝรั่ง แต่มีผลในแป้งข้าวโพด ส่วนปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการคืนตัวของแป้ง คือ การทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องก่อนการแช่เย็นหรือการแช่แข็งอุณหภูมิที่ใช้ในการแช่เย็นหรือแช่แข็งและอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งพบว่า การทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องก่อนการเก็บตัวอย่างแบบแช่แข็ง (-20°ซ) ทำให้เกิดแป้งทนต่อการย่อยได้มากขึ้น และการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60°ซ ทำให้เกิดแป้งทนต่อการย่อยได้สูงกว่าเมื่อทำแห้งที่ 100°ซ เนื่องจากการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงจะมีผลต่อการหลอมละลาย (melting point) ของแป้งที่ผ่านการคืนตัวปริมาณแป้งทนต่อการย่อย ที่ได้จากการทดลองโดยใช้หม้อนึ่งความดันความดันสูงแสดงในตาราง 2.7

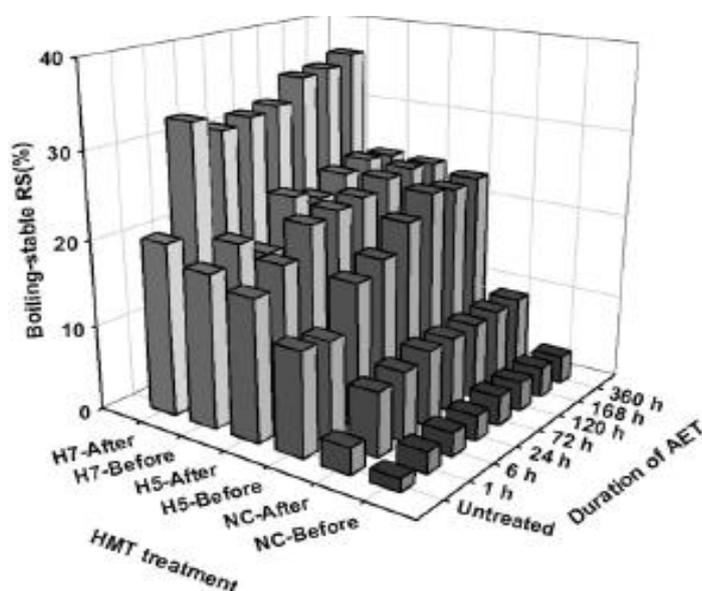
ตาราง 2.7 ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยในตัวอย่างแป้งชนิดสตาร์ชและแป้ง

ชนิดแป้ง	แป้งทนต่อการย่อย (ร้อยละ)
สตาร์ชข้าวสาลี	14.4 ± 0.87
แป้งข้าวสาลี	7.25 ± 0.56
สตาร์ชข้าวโพด	11.0 ± 0.80
แป้งข้าวโพด	1.96 ± 0.22
สตาร์ชข้าว	3.94 ± 0.50
แป้งข้าว	5.44 ± 0.30
สตาร์ชมันฝรั่ง	21.2 ± 1.30
แป้งมันฝรั่ง	14.6 ± 0.20

ที่มา: Garcia-Alonso และคณะ (1999)

Lin และคณะ (2011) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณแป้งที่ทนต่อการย่อยของแป้งข้าวโพดหลังจากการย่อยด้วยกรด-เอทานอลและให้ความร้อนขึ้น โดยนำแป้ง 25 กรัม ละลายในสารละลายเอทานอล (ร้อยละ 95) 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 45°ซ แล้วเติมกรดไฮโดรคลอริก (ความเข้มข้นร้อยละ 36%) จำนวน 1 มิลลิลิตร เก็บไว้เป็นเวลา 1-360 ชั่วโมง การหยุดปฏิกิริยาทำได้โดยแช่ในน้ำเย็นเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติมสารละลาย NaHCO<sub>3</sub> 1 โมลาร์ลงไป 14 มิลลิลิตร นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 3500 rpm

เป็นเวลา 5 นาที ล้างด้วยในสารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 50 อีก 4 ครั้ง จากนั้นนำไปอบแห้งด้วย Hot air oven ที่อุณหภูมิ 40°C นำแป้งที่ผ่านการย่อยด้วยกรดร่วมกับเอทานอลมาให้ความร้อนขึ้น โดยนำแป้ง 8 กรัม ปรับความชื้นของแป้งเป็นร้อยละ 30 (w/w) ด้วยการพรมน้ำใน stainless steel container ที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วให้ความร้อนกับแป้งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 80 นาที จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ร่อนแป้งด้วยตะแกรงร่อนขนาด 63 ไมครอน จากนั้นนำแป้ง 0.1 กรัม ใส่ในน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร มาต้มใน water bath เป็นเวลา 35 นาที แล้วทำให้เย็นด้วยน้ำแข็ง 5 นาที พบว่าวิธีการนี้ทำให้ปริมาณแป้งที่ทนต่อการย่อย ในแป้งข้าวโพดปกติมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม คือ ร้อยละ 1.5 เป็น 9.2 แป้งข้าวโพด Hylon V มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม คือ ร้อยละ 12.2 เป็นร้อยละ 24.1 ในขณะที่แป้งข้าวโพด Hylon VII มีปริมาณแป้งที่ทนต่อการย่อย เพิ่มขึ้นจากเดิม คือ ร้อยละ 18.0 เป็นร้อยละ 36.2 แสดงดังภาพประกอบ 2.13



ภาพประกอบ 2.13 ปริมาณแป้งที่ทนต่อการย่อยของแป้งข้าวโพดหลังย่อยด้วยกรด-เอทานอลและให้ความร้อนขึ้น  
ที่มา: Lin *et al.* (2011)

#### 2.6.1.2 การใช้วิธีการอัดพอง (Extrusion)

การเอกซ์ทรูดหรือการอัดพอง เป็นกระบวนการแปรรูปซึ่งรวบรวมหน่วยปฏิบัติการหลายอย่างเอาไว้ด้วยกัน คือ การผสม การนวด การทำให้เกิดแรงเฉือนและการขึ้นรูป อาหารที่ผ่านการเอกซ์ทรูดจะถูกบีบอัดจนมีสถานะกึ่งของเหลวด้วยสกรู การ เอกซ์ทรูดยังจัดเป็นกระบวนการเพิ่มขนาด โดยวัตถุดิบที่มีขนาดเล็กหรือเป็นผงจะถูกขึ้นรูปใหม่ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ปัจจัยสำคัญ 2 ประการ ซึ่งจะมีผลต่อผลิตภัณฑ์จากการเอกซ์ทรูด คือ สภาวะของเครื่องมือที่ใช้ และสมบัติทางด้านรีโอลยี (Rheological property) ของวัตถุดิบ สำหรับสภาวะเครื่องมือที่ใช้นั้น ตัวแปรที่สำคัญ คือ อุณหภูมิ ความดัน ขนาดของช่องเปิด และแรงเฉือน ซึ่งแรงเฉือนนี้จะขึ้นอยู่กับกรอกแบบภายในของทรงกระบอกที่สวมสกรู

(Barrel) ความเร็วของการหมุนและรูปทรงทางเลขาคณิตของสกรู ส่วนสมบัติของวัตถุดิบจะมีอิทธิพลต่อเนื้อสัมผัสและสีของผลิตภัณฑ์ ซึ่งปัจจัยที่สำคัญ คือ ความชื้น ลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี คือ ปริมาณและชนิดของสตาร์ช โปรตีน ไขมัน และน้ำตาล ระหว่างการทำให้อาหารเป็นแป้งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ที่สุดด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูด จะต้องมีการเพิ่มความชื้น โดยการเติมน้ำมันลงไปในส่วนผสม เพิ่มอุณหภูมิทำให้เกิดแรงเฉือนกับส่วนผสมสตาร์ชจะดูดน้ำเข้าไปพองตัว และเกิดเจลลาตินไนซ์ โครงสร้างของสตาร์ชจะคลายตัวออก ทำให้ส่วนผสมมีลักษณะข้นคล้ายพลาสติก สตาร์ชจะสลายแต่โครงสร้างจะไม่ถูกทำลายทั้งหมด การติดตามการเปลี่ยนแปลงของการละลายตัวของสตาร์ชเมื่อใช้สภาวะของอุณหภูมิและแรงเฉือนต่างๆกันจะทำได้โดยการวัดดัชนีการดูดน้ำ (water absorption index, WAI) และลักษณะการละลายน้ำ (water solubility characteristic, WSC) ค่า WAI ของผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูดจากธัญพืชจะเพิ่มขึ้นเมื่อความรุนแรงของสภาวะที่ใช้เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 180-200°ซ เครื่องเอกซ์ทรูดเดอร์จะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ สกรู (screw) ทรงกระบอกที่หุ้มสกรู (barrel) และส่วนช่องเปิด (die)

การอัดพองทำให้เกิดแป้งทนต่อการย่อยเพิ่มมากขึ้น โดยในปี 2004 Faraj และคณะ ศึกษาผลกระทบจากการอัดพองต่อการเกิดแป้งทนต่อการย่อยในแป้งข้าวบาร์เลย์แบบธรรมดา (regular) และแบบที่ไม่มีอะมิโลส (waxy starch) ทำให้สุกโดยใช้การอัดพองที่อุณหภูมิในบาร์เลย์เป็น 90 100 120 140 และ 160°ซ ตั้งแต่ทางเข้าจนถึงทางออกตามลำดับ ปริมาณความชื้นเป็นร้อยละ 20 25 30 35 และ 40 และความสูงของสกรูเป็น 60 80 และ 100 rpm พบว่าการอัดพอง ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบ (native flour) แต่การเก็บตัวอย่างที่ผ่านการอัดพองแบบแช่เย็นที่ 4°ซ 24 ชั่วโมง ทำให้มีปริมาณแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 เพิ่มขึ้น และในตัวอย่างแป้งข้าวบาร์เลย์ที่ไม่มีอะมิโลส มีปริมาณแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 ต่ำกว่าในตัวอย่างแป้งข้าวบาร์เลย์แบบธรรมดา

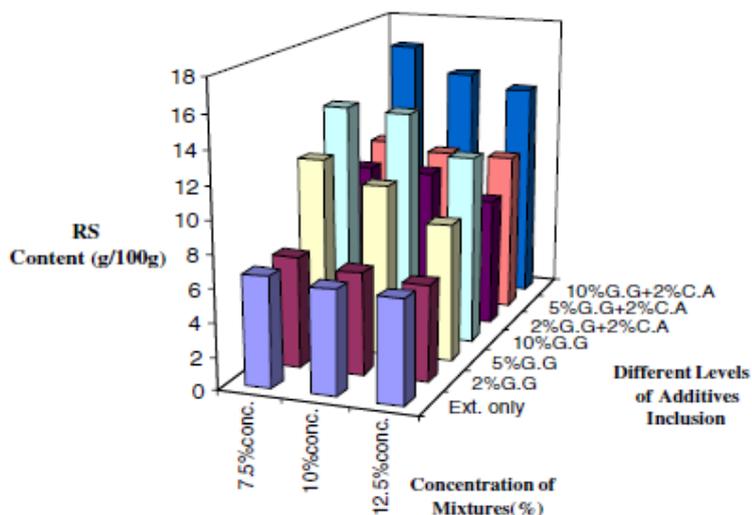
Kim และคณะ (2006) ทำการศึกษาเกี่ยวกับสภาวะในการอัดพองต่อการเกิดแป้งทนต่อการย่อยจากแป้งสาลี ตัวอย่างแป้งสาลีผ่านการอัดพองที่มีสภาวะแตกต่างกันได้แก่ ปริมาณความชื้นของวัตถุดิบร้อยละ 20 40 และ 60 ความเร็วสกรู 150 200 และ 250 rpm อุณหภูมิในบาร์เรล 40 60 80 100 และ 120°ซ จากทางเข้าถึงทางออกตามลำดับ ตัวอย่างที่ผ่านการอัดพองแล้วถูกเก็บที่อุณหภูมิ 4°ซ เป็นเวลา 0 7 และ 14 วัน วิเคราะห์ปริมาณ แป้งทนต่อการย่อยด้วยวิธี RS assay kit (AACC32-40 1995) พบว่าปริมาณของแป้งทนต่อการย่อยของแป้งสาลีที่ผ่านการอัดพองเพิ่มขึ้น 1.3 ถึง 7 เท่า หลังจากผ่านการอัดพองและเก็บไว้ 0 วัน และเพิ่มขึ้น 3 ถึง 11 เท่า ระหว่างการเก็บที่ 7 และ 14 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งสาลีที่ไม่ผ่านการอัดพอง (แป้งทนต่อการย่อยร้อยละ 0.38) การเพิ่มความชื้นของวัตถุดิบทำให้ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยเพิ่มขึ้น เนื่องจากความชื้นเป็นตัวที่ทำให้แป้งเกิดการสุกและคืนตัว โดยการคืนตัวเกิดได้สูงที่สุดเมื่อมีความชื้นในช่วงร้อยละ 40-60 ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วสกรูและการเกิดแป้งทนต่อการย่อยมีเพียง 0.018 เท่านั้น ดังนั้นการเกิดแป้งทนต่อการย่อยจึงขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของวัตถุดิบและสภาวะในการเก็บ

Huth และคณะ (2000) พบว่าการเกิดแป้งทนต่อการย่อยเพิ่มขึ้นร้อยละ 6 จากการทำการอัดพองข้าวบาร์เลย์ กับการใช้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 20 และเก็บที่อุณหภูมิ 4 หรือ 18°ซ เป็นเวลา 7 วัน

Unlu และ Faller (1998) ศึกษาเกี่ยวกับการเกิดแป้งทนต่อการย่อย โดยการใช้เครื่องอัดพองสกรูคู่ (Twin-screw extruder) สภาวะที่ใช้ คือ อุณหภูมิในบารเรล มีค่า 40 90 120 และ 140°ซ เริ่มจากทางเข้าถึงทางออกตามลำดับ สกรู 2 ตัว มีความเร็ว 200 และ 300 rpm พบว่าการเติมแป้งข้าวโพดอะมิโลสสูง (high amylose corn starch) ในขนมขบเคี้ยวที่ผ่านการอัดพอง มีปริมาณแป้งทนต่อการย่อยเพิ่มมากขึ้น จากการเติมแป้งข้าวโพดอะมิโลสสูงร้อยละ 30 ทำให้มีปริมาณแป้งทนต่อการย่อยเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 5.62 จากเดิมร้อยละ 1.27 นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีการขยายตัว และคุณสมบัติทางเนื้อสัมผัสที่ดี มีคุณภาพเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

Gonzalez-Soto และคณะ (2006) ศึกษาเรื่องการเกิดแป้งทนต่อการย่อยจากกล้วยดิบและมะม่วงดิบ และใช้แป้งข้าวโพดสำหรับเป็นตัวเปรียบเทียบใช้เครื่องอัดพอง สกรูเดี่ยว (single-screw extruder) ใช้แรงเหวี่ยงต่ำและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 130°ซ ปริมาณความชื้นเป็นร้อยละ 35 และใช้ความเร็วสกรู 30 40 และ 65 rpm พบว่าในตัวอย่างแป้งมะม่วงดิบและแป้งข้าวโพดมีปริมาณแป้งทนต่อการย่อยลดลง เมื่อเพิ่มความเร็วสกรูแต่เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแป้งทนต่อการย่อยในแป้งกล้วยและแป้งมะม่วงกับแป้งข้าวโพด พบว่า ทั้งแป้งกล้วยดิบและแป้งมะม่วงดิบ มีค่าสูงกว่าแป้งข้าวโพด

Wang และคณะ (2007) ศึกษาการเตรียมและคุณสมบัติของแป้งทนต่อการย่อยจากแป้งข้าวโพดและกัวกัมโดยวิธีอัดรีด โดยผสมแป้งข้าวโพดกับกัวกัมที่มีความเข้มข้นต่างๆ กัน (ร้อยละ 2, 5 และ 10) แล้วเติมกรดซิตริกเท่ากับร้อยละ 2.0 ของส่วนผสม ก่อนนำไปผ่านการอัดรีดด้วยเครื่อง Extruder แบบ Co-rotating ที่อุณหภูมิ 150°ซ มีความเร็วของสกรูที่ 180 rpm พบว่า แป้งที่ผ่านการอัดรีดอย่างเดี่ยวโดยไม่เติมกัวกัมและกรดซิตริกมีแป้งที่ทนต่อการย่อยเพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 6.23 ในขณะที่แป้งที่ผสมกับกัวกัมแล้วผ่านการอัดรีดมีปริมาณเพิ่มขึ้นเป็น ร้อยละ 14.27 และแป้งที่ผสมกับกัวกัมพร้อมกับการเติมกรดซิตริก แล้วผ่านการอัดรีดมีปริมาณเพิ่มขึ้นเป็น ร้อยละ 16.19 ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของกัวกัมและการเติมกรดซิตริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 2.0 ทำให้ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยเพิ่มขึ้น ดังภาพประกอบ 2.14

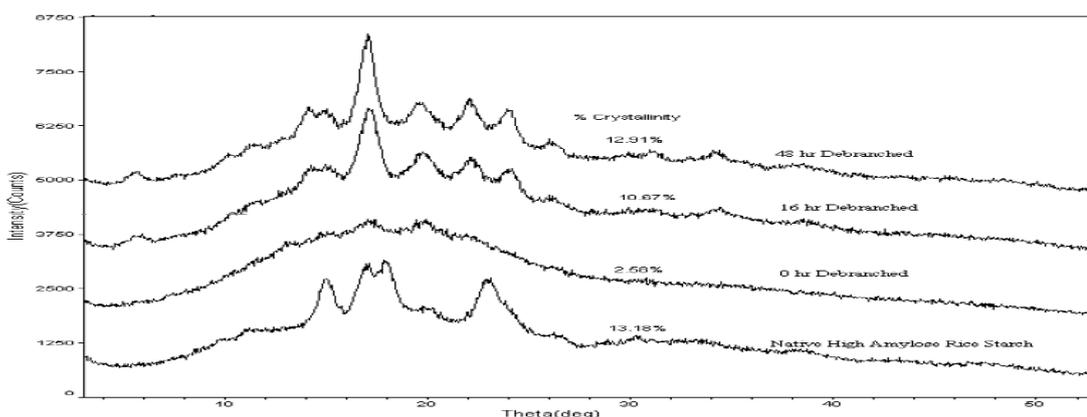


ภาพประกอบ 2.14 ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยของแป้งและกาวกัมที่ผ่านการอัดรีดผสมกับการเติมกรดซิตริกและไม่เติมกรดซิตริก  
ที่มา: Wang *et al.* (2007)

### 2.6.2 การเกิดแป้งทนต่อการย่อยโดยใช้ความร้อนร่วมกับการใช้เอนไซม์

ในปี 2006 Gonzalez-Soto และคณะ ศึกษาอิทธิพลของเวลาและอุณหภูมิการเก็บที่มีต่อการเกิดแป้งทนต่อการย่อยจากแป้งกล้วยที่ผ่านการตัดกิ่งก้าน โดยใช้เอนไซม์พุลูลานาส (Pullulanase) บ่มไว้นาน 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำแป้งกล้วยที่ผ่านการตัดกิ่งก้านโมเลกุลไปให้ความร้อนที่ 121°ซ นาน 30 นาที อีกครั้ง ทำให้เย็นลงแล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิระหว่าง 4-60°ซ เวลา 24 และ 48 ชั่วโมง พบว่าปริมาณแป้งทนต่อการย่อยเพิ่มขึ้นจากตัวอย่างควบคุม (ร้อยละ 9.07) โดยปริมาณแป้งทนต่อการย่อยสูงสุด (ร้อยละ 34.84) ได้จากสภาวะการเก็บที่ 4°ซ 24 ชั่วโมง การตัดกิ่งก้านโมเลกุลแป้ง และการใช้หมอนึ่งความดันช่วยทำให้การเกิดแป้งทนต่อการย่อยมากขึ้น

Pongjanta และคณะ (2008) ศึกษาการตัดแปรโครงสร้างสตาร์ชข้าวอะมิโลสสูง (ร้อยละ 32.10) ด้วยเอนไซม์พุลูลานาส (E.C.232-983-9P,8 ยูนิตต่อกรัมสตาร์ช) ย่อยตัดพันธะกิ่งแอมิโลเพกทินในโมเลกุลสตาร์ชข้าวเข้มน้ำหนัก ซึ่งให้ความร้อน (75°ซ. นาน 30 นาที) ก่อน แล้วย่อยตัดพันธะกิ่งนาน 0 ถึง 48 ชั่วโมง (ที่ 55°ซ.) พบว่าเอนไซม์พุลูลานาสสามารถตัดพันธะกิ่งแอมิโลเพกทินได้ร้อยละ 0.14 ถึง 1.55 เมื่อนำสตาร์ชที่ตัดพันธะกิ่งมาต้มสุกและทำให้เย็น (4°ซ นาน 16 ชั่วโมง) จนเกิดรีโทรเกรดชัน แล้วคืนรูปจากเยือกแข็ง (-10/30°ซ.) เพื่อให้โมเลกุลสตาร์ชจัดเรียงตัวใหม่และเพิ่มการบีบน้ำออก มีผลให้ระดับการเกิดรีโทรเกรดชันเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 28.10 เป็นร้อยละ 54.53 และปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 4.80 เป็น 12.33 เมื่อทำการตัดแปรด้วยพุลูลานาสนาน 0 ถึง 48 ชั่วโมง ตามลำดับ และการตัดพันธะกิ่งทำให้โมเลกุลสตาร์ชเรียงตัวใหม่มากขึ้นและเปลี่ยนโครงสร้างผลึกสตาร์ชจากแบบ A เป็นแบบ V เมื่อตรวจสอบด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ดังภาพประกอบ 2.15



ภาพประกอบ 2.15 โมเลกุลสตาร์ชเรียงตัวใหม่และการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกสตาร์ชจากแบบ A เป็นแบบ V เมื่อตรวจสอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์  
ที่มา: Pongjanta และคณะ (2008)

Tan (2003) ศึกษาการเกิดแป้งทนต่อการย่อยจากแป้งข้าวที่เป็นสตาร์ชและแป้งโดยการใช้อเอนไซม์ และการใช้ความร้อนร่วมกับเอนไซม์ ซึ่งเอนไซม์ที่ใช้ คือ เอนไซม์อะไมเลส (amylase) เอนไซม์พุลูลานาส (pullulanase) และเอนไซม์อะไมเลสร่วมกับเอนไซม์พุลูลานาส ตัวอย่างแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ตัวอย่างน้ำแป้งที่ไม่ทำให้สุก ที่ทำให้สุก และเก็บไว้ที่อุณหภูมิตู้เย็นข้ามคืน และที่ทำให้สุกแต่ไม่ได้เก็บแช่เย็น จากนั้นเติมเอนไซม์ เอนไซม์อะไมเลส เอนไซม์พุลูลานาส และเอนไซม์อะไมเลส ร่วมกับเอนไซม์พุลูลานาส บ่มทิ้งไว้ 24 และ 16 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า การใช้เอนไซม์พุลูลานาส ทำให้เกิดแป้งทนต่อการย่อยมากที่สุด โดยสตาร์ชจากข้าวเกิดแป้งทนต่อการย่อยได้มากกว่าแป้งข้าวและสตาร์ชที่ไม่ผ่านการทำให้แป้งสุกเกิดแป้งทนต่อการย่อยสูงสุดร้อยละ 40-70 ในขณะที่แป้งข้าวมีปริมาณแป้งทนต่อการย่อย เพียงร้อยละ 4 ส่วนตัวอย่างแป้งที่ผ่านการทำให้สุกแป้งทนต่อการย่อยเกิดมากที่สุดเมื่อใช้เวลาในการบ่มกับเอนไซม์นานขึ้น โดยมีปริมาณแป้งทนต่อการย่อย เป็นร้อยละ 26.8

Kiatpongarp (2007) ศึกษาการผลิตแป้งทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ชนิด 3 จากมันสำปะหลัง (*Manihot esculenta* Crantz) โดยทำการตัดกึ่งแป้งเปียก (ความเข้มข้นร้อยละ 5, 8 และ 10) ด้วยเอนไซม์พุลูลานาส ที่ระดับความเข้มข้นของเอนไซม์ 5, 15 และ 30 พุลูลานาสยูนิตต่อกรัม แป้งเป็นระยะเวลา 0 ถึง 44 ชั่วโมง พบว่า ระดับการย่อยเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของเอนไซม์และระยะเวลาการย่อยเพิ่มขึ้นในช่วงปริมาณแป้งร้อยละ 5 ถึง 8 โดยระดับการย่อยมีค่าสูงสุดที่ปริมาณแป้งร้อยละ 8 และปริมาณเอนไซม์พุลูลานาส 15 และ 30 พุลูลานาสยูนิต การตัดกึ่งแป้งร้อยละ 8 ด้วยเอนไซม์พุลูลานาส 15 พุลูลานาสยูนิต เป็นระยะเวลา 30 นาที ถึง 24 ชั่วโมง ทำให้ระดับการตัดกึ่งเพิ่มขึ้นจาก ร้อยละ 58.9 เป็นร้อยละ 89.3 และจำนวนสายโซ่เฉลี่ยมีมากขึ้นจาก 22 เป็น 42 สายโซ่ ขณะที่ระดับการพอลิเมอร์ไรเซชันเฉลี่ยลดลงจาก 117 ถึง 61 เมื่อระดับการตัดกึ่งเพิ่มขึ้น โมเลกุลที่มีมวลโมเลกุลต่ำและโมเลกุลเส้นตรงหลุดออกมามากขึ้น ซึ่งตรวจสอบจากความสามารถในการจับกับไอโอดีนและความสามารถในการอุ้มน้ำ ในระหว่างการตัดกึ่งโมเลกุลเส้นตรงเกิดการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ ทำให้แป้งทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์เกิดขึ้นในปริมาณร้อยละ 18.25 ที่ระดับ

การตัดกิ่งร้อยละ 89.3 การรีโทรเกรดแป่งตัดกิ่งที่อุณหภูมิ 5°ซ เป็นเวลา 4 วัน ทำให้ปริมาณแป่งทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 12.02 เป็นร้อยละ 27.56 ที่ระดับการตัดกิ่งร้อยละ 58.9-89.3 การศึกษาคุณสมบัติทางผลึกของแป่งทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ตรวจสอบโดยเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน พบว่า เมื่อระดับการตัดกิ่งเพิ่มขึ้น ปริมาณผลึกเพิ่มมากขึ้น โดยแป่งตัดกิ่งแสดงรูปแบบผลึกชนิด C และ CA แต่แป่งตัดกิ่งที่เกิดการรีโทรเกรดแสดงรูปแบบผลึกชนิด CB จากสัดส่วนการดูดกลืนแสงของฟูรีเออร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดที่หมายเลขคลื่น 1045 ต่อ 1037 เซนติเมตร<sup>-1</sup> พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผลึกสูงขึ้น อุณหภูมิการหลอมเหลวของแป่งทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์จากแป่งตัดกิ่งมีอุณหภูมิในช่วง 50-120°ซ ขณะแป่งตัดกิ่งที่เกิดการรีโทรเกรดมีอุณหภูมิที่สูงกว่าในช่วง 130 ถึง 150°ซ ตามลำดับ

## 2.7 การถดถอย

การถดถอย (Regression) เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ (mathematical relationship) ระหว่างตัวแปร 2 ตัวหรือตัวแปรมากกว่า 2 ตัว โดยที่มีตัวแปร 1 ตัวเป็นตัวแปรตาม (dependent variable) และตัวแปรอีก 1 ตัว หรือมากกว่า 1 ตัวเป็นตัวแปรอิสระ (independent variable) โดยมีวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายดังต่อไปนี้

1. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม (Y) และตัวแปรต้น/ตัวแปรอิสระ (X)
2. ประมาณ ทำนายค่าตัวแปรตาม (Y) เมื่อทราบค่าตัวแปรอิสระ (X)

สมการการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

$$Y = a + bX$$

โดยที่ Y คือ ตัวแปรตาม

X คือ ตัวแปรอิสระ

a คือ ค่าคงที่ (intercept): ค่าของ เมื่อ X เป็น 0

b คือ สัมประสิทธิ์แห่งการกำหนด (regression coefficient)/ความชันของเส้นตรง

สัมประสิทธิ์แห่งการกำหนด (Coefficient of determination) ซึ่งเท่ากับ  $R^2$  เป็นค่าสัดส่วนหรือร้อยละที่บอกให้ทราบว่า การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรหนึ่งสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของอีกตัวแปรหนึ่งด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นได้ดีเพียงใด โดยไม่คำนึงถึงว่าตัวแปรใดเป็นตัวแปรอิสระหรือตัวแปรตาม ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 หรือ 0 ถึง 100 ถ้า  $R^2$  มีค่าเข้าใกล้ 1 ก็แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรหนึ่งสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของอีกตัวแปรหนึ่งด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นได้ดี แต่ถ้า  $R^2$  มีค่าน้อยมากก็แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรหนึ่งไม่สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของอีกตัวแปรหนึ่งด้วยสมการ

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Siljestrom และ Asp (1985) ได้ศึกษาแป้งสาลีที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันแล้ว พบว่า มีปริมาณแป้งทนต่อการย่อยร้อยละ 9 เมื่อเทียบกับแป้งสาลีที่ไม่ผ่านการทำให้สุก ซึ่งมีปริมาณแป้งทนต่อการย่อย น้อยกว่าร้อยละ 1

Onyango และคณะ 2006 ศึกษาอิทธิพลของเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มต่อการเกิดแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 จากการให้ความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งความดันและการย่อยด้วยกรดในแป้งมันสำปะหลัง เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแป้งทนต่อการย่อยในแป้งมันสำปะหลัง (ร้อยละ 0.44) พบว่าการใช้หม้อนึ่งความดันและการย่อยด้วยกรดทำให้มีปริมาณแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 เพิ่มขึ้น โดยเมื่อใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายมีปริมาณมากที่สุดเมื่อบ่มไว้ที่อุณหภูมิ 100°ซ 48 ชั่วโมง (ร้อยละ 9.68) และในกรดแลคติกให้ปริมาณมากที่สุดเมื่อบ่มไว้ที่อุณหภูมิ 60°ซ เวลา 48 ชั่วโมง (ร้อยละ 9.97)

Garcia-Alonso และคณะ (1999) ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยบางตัวที่มีผลเกี่ยวเนื่องในการสุกและการคืนตัวของแป้งวัตถุดิบที่ใช้คือ แป้งสาลี แป้งข้าวโพด แป้งข้าว และแป้งมันฝรั่ง ที่เป็นแบบสตาร์ช (starch) และแป้ง (flour) ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการสุกของแป้ง ได้แก่ วิธีการทำให้แป้งสุก การคนระหว่างการสุก และพีเอช พบว่าการทำให้สุกด้วยการใช้หม้อนึ่งความดันความดันสูง (high pressure autoclave) และการต้มในอ่างน้ำเดือด (water bath) และการคนระหว่างการทำให้สุกในหม้อนึ่งความดันความดันสูง ทำให้เกิดแป้งทนต่อการย่อยไม่แตกต่างกันในทุกตัวอย่างแป้ง ส่วนพีเอชที่ศึกษาอยู่ในช่วง 3.5-10.5 ไม่มีผลต่อการเกิดแป้งทนต่อการย่อยในแป้งสาลี แป้งข้าว และแป้งมันฝรั่ง แต่มีผลในแป้งข้าวโพด ส่วนปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการคืนตัวของแป้งคือ การทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องก่อนการแช่เย็นหรือการแช่แข็งอุณหภูมิที่ใช้ในการแช่เย็นหรือแช่แข็งและอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งพบว่า การทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องก่อนการเก็บตัวอย่างแบบแช่แข็ง (-20°ซ) ทำให้เกิดแป้งทนต่อการย่อยได้มากขึ้น และการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60°ซ ทำให้เกิดแป้งทนต่อการย่อยได้สูงกว่าเมื่อทำแห้งที่ 100°ซ เนื่องจากการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงจะมีผลต่อการหลอมละลาย (melting point) ของแป้งที่ผ่านการคืนตัวปริมาณแป้งทนต่อการย่อย ที่ได้จากการทดลองโดยใช้หม้อนึ่งความดันความดันสูง

Lin และคณะ (2011) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณแป้งที่ทนต่อการย่อยของแป้งข้าวโพดหลังจากการย่อยด้วยกรด-เอทานอลและให้ความร้อนขึ้น โดยนำแป้ง 25 กรัม ละลายในเอทานอล (95%) 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 45°ซ แล้วเติมกรดไฮโดรคลอริก (ความเข้มข้น 36%) จำนวน 1 มิลลิลิตร เก็บไว้เป็นเวลา 1-360 ชั่วโมง การหยุดปฏิกิริยาทำได้โดยแช่ในน้ำเย็นเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติมสารละลาย NaHCO<sub>3</sub> 1 โมลาร์ลงไป 14 มิลลิลิตร นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 3500 rpm เป็นเวลา 5 นาที ล้างด้วยเอทานอล 50% อีก 4 ครั้ง จากนั้นนำไปอบแห้งด้วย Hot air oven ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส นำแป้งที่ผ่านการย่อยด้วยกรดร่วมกับเอทานอลมาให้ความร้อนขึ้น โดยนำแป้ง 8 กรัม ปรับความชื้นของแป้งเป็นร้อยละ 30 (w/w) ด้วยการพรมน้ำใน stainless steel container ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วให้ความร้อนกับแป้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 80 นาที จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ร่อนแป้งด้วยตะแกรงร่อนขนาด 63 µm จากนั้นนำแป้ง 0.1 กรัม ใส่ในน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร มาต้มใน water bath เป็นเวลา 35 นาที แล้ว

ทำให้เย็นด้วยน้ำแข็ง 5 นาที พบว่าวิธีการนี้ทำให้ปริมาณแป้งที่ทนต่อการย่อย ในแป้งข้าวโพดปกติมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมคือ 1.5 เป็น 9.2 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวโพด Hylon V มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม คือ 12.2 เป็น 24.1 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่แป้งข้าวโพด Hylon VII มีปริมาณแป้งที่ทนต่อการย่อย เพิ่มขึ้นจากเดิม คือ 18.0 เป็น 36.2 เปอร์เซ็นต์

Escarpa และคณะ (1996) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดแป้งทนต่อการย่อย โดยใช้หม้อนึ่งความดันสูง (High-Pressure Autoclave, HPA) ในแป้งมันฝรั่ง พบว่าการใช้ HPA ที่ความดัน 2 บาร์ อุณหภูมิ 115-136 องศาเซลเซียส 20 นาที ทำให้มีปริมาณแป้งทนต่อการย่อย (ร้อยละ 18.16) สูงกว่าที่ได้จากการต้มในอ่างน้ำเดือด (Water bath) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง (ร้อยละ 11.06) แป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะมีปริมาณแป้งทนต่อการย่อยมากกว่า

Sievert และ Pomeranz (1989) ศึกษาการเกิดแป้งทนต่อการย่อยจากการใช้หม้อนึ่งความดัน (autoclave) โดยใช้อัตราส่วนของแป้งต่อน้ำเป็น 1 ต่อ 3.5 และ 1 ต่อ 10 ให้ความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งความดันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 121 134 และ 148 องศาเซลเซียส ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างในที่เย็นโดยเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง ให้ความร้อนและทำให้เย็น (autoclave-cooling) ซ้ำถึง 20 รอบ และทำให้แห้งโดยใช้วิธีการอบแห้งแบบระเหิด (Freeze-dry) พบว่าการใช้อัตราส่วนแป้งต่อน้ำ 1 ต่อ 3.5 ทำให้เกิดแป้งทนต่อการย่อยได้สูงกว่าเมื่อใช้อัตราส่วนแป้งต่อน้ำเป็น 1 ต่อ 10 เนื่องจากปริมาณน้ำที่มากเกินไปทำให้สารละลายเจือจางส่วนอุณหภูมิที่ใช้ที่ 121 และ 134 องศาเซลเซียส ปริมาณแป้งทนต่อการย่อย แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยแต่เมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยลดลงอาจเป็นเพราะที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการทำลายโครงสร้างของ retrograded amylase ได้