ผลของการให้ความร้อนและการทำให้เย็น ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการย่อยของแป้ง

Effects of Heating and Cooling on Structural Change and Digestion of Starch

ธนาภร รติธรรมธร*

Thanaporn Ratithammatorn*

สาขาพรีคลินิก คณะพยาบาลศาสตร์ วิทยาลัยนานาชาติเซนต์เทเรซา

Program in Pre-Clinic, Faculty of Nursing Science, St Theresa International College

Received : 16 July 2014

Accepted : 2 March 2015

Published online : 11 August 2016

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเรื่องแป้ง เกี่ยวกับโครงสร้างและองค์ประกอบพื้นฐาน การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเมื่อแป้งถูกกระทำโดยการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ การย่อยและการดูดซึมแป้ง เมื่อแป้งดิบถูกกระทำด้วยความร้อนกลายเป็นแป้งสุกโดยผ่านกระบวนการเจลาติไนซ์เซชัน ทำให้โครงสร้างเม็ดแป้งถูกเปลี่ยนแปลงให้ง่ายต่อการถูกย่อยโดยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหาร เมื่อปล่อยแป้งสุกทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงโดยผ่านกระบวนการรีโทรกราเดชันกลายเป็นแป้งคืนตัว การจัดเรียงตัวของโครงร่างผลึกใหม่ ทำให้แป้งกลับถูกเปลี่ยนแปลงให้มีความทนทานต่อการถูกย่อยโดยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหาร และสามารถผ่านเข้าไปถึงบริเวณลำไส้ใหญ่ เพื่อให้จุลินทรีย์สุขภาพใช้เป็นสารตั้งต้นในการเกิดกระบวนการหมักได้

คำสำคัญ: แป้ง แป้งดิบ แป้งสุก แป้งคืนตัว

Abstract

This article focuses on the structure and the basic composition of starch, its structural changes upon increase or decrease in temperature which affect the digestion and absorption of starch in gastrointestinal (GI) tract. When native starch undergoes gelatinization upon heating, the crystalline structures of starch granules are disrupted; thereby allowing GI tract enzymes to digest them easily. When gelatinized starch is cooled down, starch molecules become recrystallization and retrograded starch is formed. Because retrograded starch is highly resistant to digestive enzymes of the GI tract, it can pass into a large intestine where probiotics can use it as a substrate for microbial fermentation.

Keywords: starch, native starch, gelatinized starch, retrograded starch

***Corresponding author. E-mail**: tp.rt_lee@yahoo.com

บทนำ

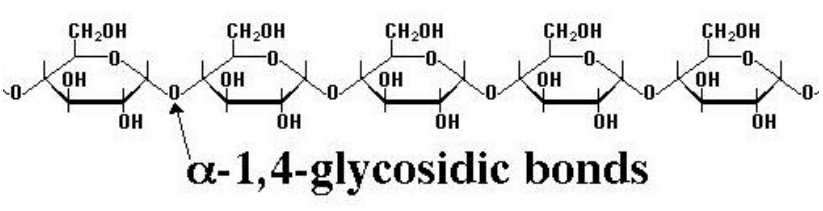
แป้งเป็นหนึ่งในอาหารหลักที่มีความสำคัญต่อชีวิตประจำวัน เนื่องจากถูกนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานหลักสำหรับกระบวนการเผาผลาญของร่างกาย แป้งจากส่วนต่างๆ ของพืชจะถูกเก็บสะสมไว้ในรูปเม็ดแป้ง (starch granules) การที่เม็ดแป้งดิบถูกกระทำด้วยกระบวนการต่างๆ เช่น ความร้อน สารเคมี เป็นต้น ส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพของแป้ง การเพิ่มอุณหภูมิทำให้แป้งดิบเปลี่ยนเป็นแป้งสุก การลดอุณหภูมิทำให้แป้งสุกเปลี่ยนเป็นแป้งคืนตัว ซึ่งมีผลทำให้โมเลกุลของแป้งเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ในรูปผลึกที่มีความแข็งแรงขึ้น จึงทำให้แป้งคืนตัวมีความทนทานต่อการถูกย่อยโดยเอนไซม์ที่บริเวณทางเดินอาหารส่วนต้นและสามารถผ่านเข้าไปถึงบริเวณลำไส้ใหญ่ สามารถใช้เป็นแหล่งอาหารจุลินทรีย์ (prebiotics) สำหรับจุลินทรีย์สุขภาพ (probiotics) (Wrong, 1981) ดังนั้น แป้งจึงถูกนำมาดัดแปรหรือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง โดยมีวัตถุประสงค์และประโยชน์ของการนำไปประยุกต์ใช้ที่แตกต่างกัน เพื่อพัฒนาแป้งให้อยู่ในรูปแบบอาหารเสริมสุขภาพ ซึ่งกำลังเป็นกระแสที่อยู่ในความสนใจของนักวิจัยในปัจจุบัน และเพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการของคนในปัจจุบันที่หันมาใส่ใจดูแลสุขภาพของตนเองมากขึ้น โดยการเลือกที่จะบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพในการเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับร่างกาย

โครงสร้างและองค์ประกอบพื้นฐานของแป้ง

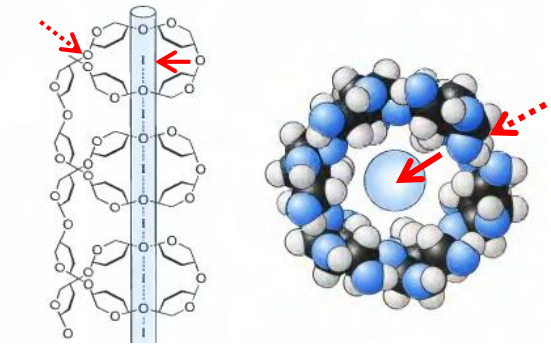
แป้ง (starch) เป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดโฮโมพอลีแซ็กคาไรด์ (homopolysaccharide) ในโมเลกุลประกอบด้วยโมโนแซ็กคาไรด์เพียงชนิดเดียวคือ กลูโคส มีสูตรเคมีโดยทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เป็นพอลิเมอร์ของหน่วยกลูโคสเชื่อมต่อกับพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์ มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group) มีคุณสมบัติรีดิวซ์ที่เรียกว่า reducing end group (Srirot & Piyachomkwan, 2003) แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์หลักสองชนิดคือ อะมิโลส (amylose) และอะมิโลเพกติน (amylopectin)

อะมิโลส เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสประมาณ 200-2,000 โมเลกุล เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ **α**-1,4 glycosidic ดังแสดงในภาพที่ 1 แป้งจากพืชต่างชนิดกันมีตำแหน่งการวางตัวของอะมิโลสภายในเม็ดแป้งที่ต่างกัน อะมิโลสบางส่วนแทรกอยู่ในกลุ่มของอะมิโลเพกติน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (amorphous regions) ซึ่งเป็นส่วนที่โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบและส่วนผลึก (crystalline regions) ที่โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ อะมิโลสที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จะพบเป็นเกลียวคู่ (double helix) กับอะมิโลเพกตินในส่วนใจกลางเม็ดแป้ง ส่วนอะมิโลสโมเลกุลขนาดเล็กจะพบอยู่ตามขอบเม็ดแป้ง แป้งต่างชนิดกันมีปริมาณอะมิโลสไม่เท่ากัน แป้งส่วนใหญ่จะมีอะมิโลสประมาณร้อยละ 25 แป้งบางชนิดมีปริมาณอะมิโลสสูงถึงร้อยละ 70-75 เช่น high amylose corn starch แต่แป้งบางชนิดไม่มีอะมิโลสเลยเรียกว่า waxy starch (Oates, 1996) อะมิโลสสามารถจับกับไอโอดีนโดยจะพันเป็นเกลียวรอบไอโอดีนได้สารประกอบเชิงซ้อน (amylose-iodine complex) สีน้ำเงินดังแสดงในภาพที่ 2 สีที่เกิดขึ้นจะผันแปรตามความยาวและจำนวนเกลียวของสายอะมิโลส ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการตรวจสอบและบ่งบอกลักษณะเฉพาะของแป้งที่มีอะมิโลสเป็นองค์ประกอบได้ แต่วิธีการนี้ก็อาจจะได้ผลที่คลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากมีข้อจำกัดจากความไม่คงตัวของสีที่เกิดขึ้นจากการที่อะมิโลเพกตินที่มีความยาวของกิ่งก้านมากๆ ก็สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนได้เช่นเดียวกับอะมิโลส ซึ่งอาจทำให้การวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสคลาดเคลื่อนเกินกว่า

ปริมาณที่มีอยู่จริงในแป้ง Gibson และคณะ (1997) ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสที่มีความเที่ยงตรงมากขึ้น โดยการใช้ concanavalin A เพื่อทำการตกตะกอนอะมิโลเพกตินออกไปก่อน แล้วจึงทำการวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสที่เหลืออยู่



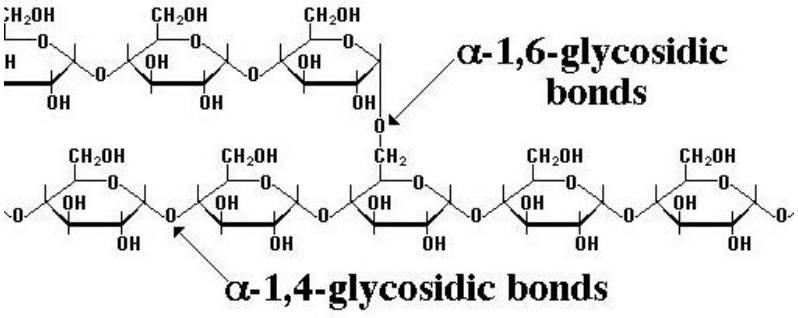
ภาพที่ 1 โครงสร้างของอะมิโลส (Wils, 2011)



ภาพที่ 2 โครงสร้างของ amylose-iodine complex

ซ้าย: ภาพด้านข้างของสายอะมิโลสที่พันเป็นเกลียวรอบไอโอดีน ขวา: ภาพมุมมองด้านบนของโมเลกุลไอโอดีนที่ถูกล้อมรอบอยู่ภายในเกลียวของสายอะมิโลส; ลูกศรทึบแสดงโมเลกุลไอโอดีน ลูกศรประแสดงเกลียวของสายอะมิโลส (Arora, 2012)

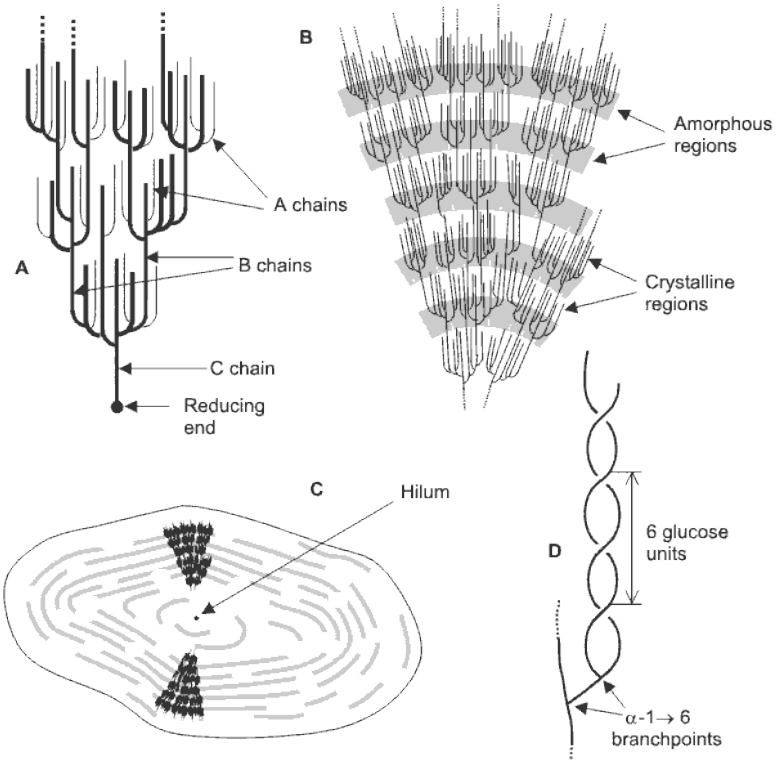
อะมิโลเพกติน เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสจับกันด้วยพันธะ **α**-1,4 glycosidic และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาของกลูโคสจับกันด้วยพันธะ **α**-1,6 glycosidic ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 โครงสร้างของอะมิโลเพกติน (Wils, 2011)

โครงสร้างของเม็ดแป้ง

พืชจะเก็บแป้งไว้ในเม็ดแป้ง ขนาดของเม็ดแป้งจะมีค่าประมาณ 1-100 μm ขึ้นกับชนิดของพืช แป้งจากพืชต่างชนิดกันจะมีลักษณะเฉพาะของโครงสร้างทางเคมี กายภาพ รวมทั้งขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกัน การใช้เทคนิค X-ray diffraction ในการวิเคราะห์เม็ดแป้ง พบว่ามีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) ประกอบด้วยส่วนอสัณฐานและส่วนผลึก โครงสร้างทั้งสองนี้จะมีการเรียงตัวซ้อนกันเป็นชั้นในแนวรัศมี โดยมีจุดเริ่มต้นที่จุดศูนย์กลางของเม็ดแป้งเรียกว่าไฮลัม (hilum) (Tester, 1997) ความเป็นผลึกเกิดจากการเรียงตัวของอะมิโลเพกตินเป็นกลุ่มในรูปคลัสเตอร์ (clusters) แต่ละคลัสเตอร์ประกอบด้วยส่วนโครงสร้างของจุดแตกกิ่งที่มีการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบเป็นส่วนอสัณฐาน และบริเวณที่มีสายของอะมิโลเพกตินที่จัดเรียงตัวอย่างมีระเบียบแบบเกลียวคู่ (double helix) รวมกันเป็นผลึกด้วยพันธะไฮโดรเจนเกิดเป็นส่วนผลึกแป้ง (Donald *et al*., 1997) ดังแสดงในภาพที่ 4



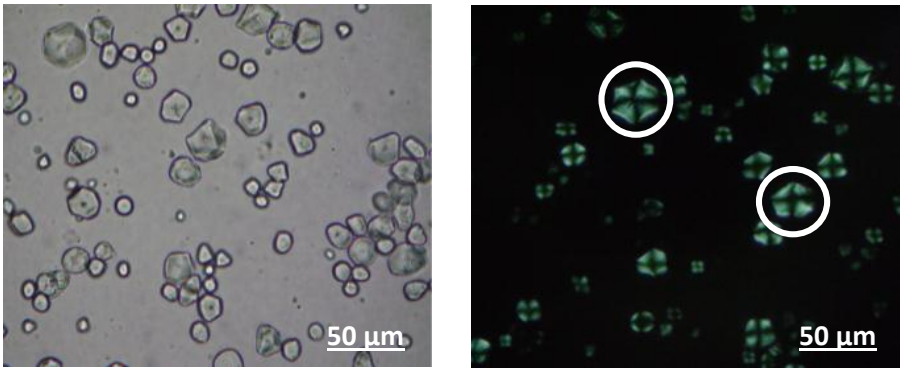
ภาพที่ 4 ส่วนประกอบโครงสร้างของเม็ดแป้ง

A: โครงสร้างแบบกึ่งของอะมิโลเพกติน B: โครงสร้างแบบกึ่งผลึก

C: ภาพตัดขวางแสดงการเรียงตัวของอะมิโลเพกติน D: โครงสร้างเกลียวคู่ของอะมิโลเพกติน (Chaplin, 2014)

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเม็ดแป้งเมื่อถูกความร้อน

แป้งดิบ (native starch หรือ raw starch) เป็นแป้งที่ผ่านกรรมวิธีการผลิตทางอุตสาหกรรมจากพืชที่เก็บสะสมแป้งไว้ตามส่วนหัว ราก เมล็ดและผล แป้งจะถูกเก็บไว้ในรูปเม็ดแป้ง โครงสร้างพื้นฐานของเม็ดแป้งดิบเมื่อนำไปส่องดูภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์ (polarized light microscope) จะแสดงคุณสมบัติของการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (birefringence) ทำให้มองเห็นเม็ดแป้งในลักษณะที่เป็นรูปกากบาท (maltese cross) อย่างชัดเจน ซึ่งเกิดจากลักษณะโครงสร้างที่เป็นระเบียบในรูปผลึกของเม็ดแป้ง (Kerr, 1950) สอดคล้องกับการศึกษาของ Ratithammatorn (2010) ที่นำแป้งข้าวเหนียวดิบ (glutinous rice starch) แป้งข้าวโพดดิบ (corn starch) แป้งมันฝรั่งดิบ (potato starch) และแป้งถั่วเขียวดิบ (mung bean starch) ไปตรวจดูลักษณะโครงสร้างเม็ดแป้งภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงธรรมดา (normal light microscope) และกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์ ผลการศึกษาพบว่า แป้งทั้ง 4 ชนิดมีขนาด รูปร่าง ลักษณะผิวของเม็ดแป้งที่แตกต่างกันออกไปตามชนิดของพืช และแสดงคุณสมบัติของการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ ทำให้มองเห็นเม็ดแป้งในลักษณะที่เป็นรูปกากบาทได้อย่างชัดเจน ในที่นี้ได้แสดงตัวอย่างเฉพาะเม็ดแป้งข้าวโพด (ภาพที่ 5) เท่านั้น



ภาพที่ 5 ลักษณะเม็ดแป้งข้าวโพดดิบภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงธรรมดา (ซ้าย) และกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์ (ขวา) กำลังขยาย×400 [วงกลมแสดงสมบัติของการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ลักษณะรูปกากบาท] (Ratithammatorn, 2010)

แป้งสุก (gelatinized starch หรือ cooked starch) เกิดจากการนำแป้งดิบมาละลายน้ำแล้วให้ความร้อน การเพิ่มอุณหภูมิทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในโมเลกุลของเม็ดแป้ง และส่งผลให้เม็ดแป้งดิบเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ แป้งดิบถูกเปลี่ยนเป็นแป้งสุกด้วยกระบวนการที่เรียกว่า เจลาติไนซ์เซชัน (gelatinization) ในสภาวะปกติแป้งดิบจะไม่ละลายน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ (gelatinization temperature) ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่แป้งดิบเริ่มเกิดการเจลาติไนซ์ (การสุก) อยู่ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส แป้งดิบแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิเจลาติไนซ์ที่แตกต่างกันตามชนิดของพืช เช่น มันฝรั่ง: 60-65 ข้าวโพด: 75-80 แป้งสาลี: 80-85 แป้งมันสำปะหลัง: 65-70 องศาเซลเซียส (Pornchaloempong & Rattanapananon, 2010) น้ำแป้งเกิด

ความหนืดเนื่องจากเกิดการลดลงของโมเลกุลน้ำอิสระที่อยู่รอบๆ เม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งมีพื้นที่การเคลื่อนไหวได้จำกัด เป็นจุดของอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการสุกของแป้ง อุณหภูมิ ณ จุดนี้ เม็ดแป้งจะเกิดการสูญเสียสมบัติของการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ ลักษณะรูปกากบาทในเม็ดแป้งจะลดลงหรือหายไป (loss of birefringence) (Collison, 1968) เมื่อเพิ่มความร้อนสูงขึ้นจนความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเรียกอุณหภูมิจุดนี้ว่า pasting temperature เม็ดแป้งเกิดการพองตัวจนถึงจุดสูงสุดและเกิดความหนืดสูงที่สุด (peak viscosity) เม็ดแป้งก็จะแตกออก (Takahashi & Seib, 1988)

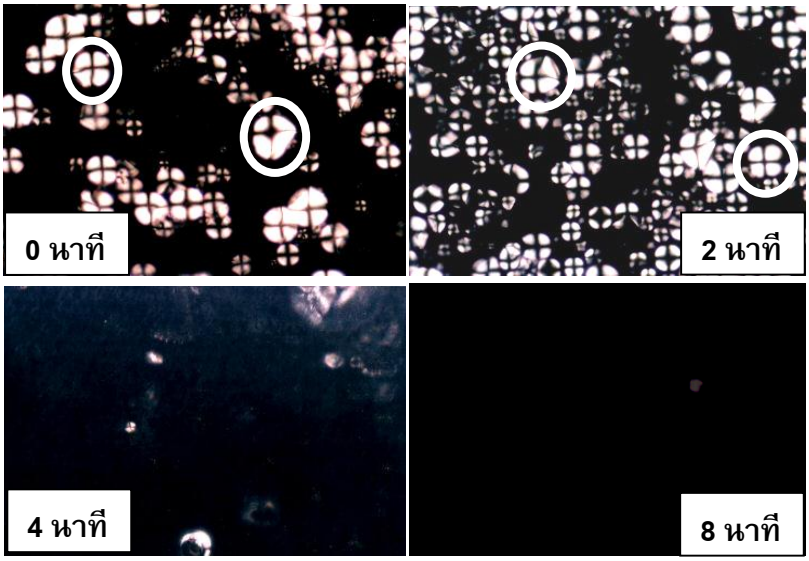
ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างจากแป้งดิบเป็นแป้งสุก จากการวิจัยของ Yotsawimonwat และคณะ (2007) ที่ใช้แป้งมันสำปะหลังดิบ (native tapioca starch) มาเตรียมเป็นน้ำแป้งดิบให้มีความเข้มข้นของแป้ง 5% โดยน้ำหนักแล้วนำไปต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 95±1 องศาเซลเซียส ณ เวลาต่างๆ แล้วนำไปใช้เป็นสารช่วยยึดเกาะผสมกับแป้งมันสำปะหลังดิบ เพื่อเตรียมเป็นแกรนูลสำหรับใช้เป็นสารช่วยเอนกประสงค์สำหรับการผลิตยาเม็ด ผลการศึกษาได้สรุปไว้ในตารางที่ 1 และภาพที่ 6

ตารางที่ 1 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งมันสำปะหลังดิบที่ให้ความร้อน โดยการนำน้ำแป้งดิบไปไว้ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียส ในเวลาที่ต่างกัน (n=3); ดัดแปลงจาก Yotsawimonwat และคณะ

เวลาในการต้ม (นาที)	**อุณหภูมิของน้ำแป้ง (^{o}C)**	**เส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดแป้ง (μm)**	**ลักษณะ birefringence**
0	22.3 ± 0.58	11.4 ± 4.1	รูปกากบาทชัดเจน
2	62.0 ± 1.73	13.4 ± 5.3 (พองตัว)	รูปกากบาทชัดเจน
4	75.0 ± 3.46	84.4 ± 24.0 (พองตัวเต็มที่)	รูปกากบาทไม่ชัดเจน
8	83.7 ± 3.16	วัดไม่ได้ (เม็ดแป้งแตก)	ไม่พบรูปกากบาท

ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าความร้อนมีผลทำให้สมบัติและโครงสร้างของแป้งดิบเปลี่ยนแปลงได้ จากการสังเกตภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์ เมื่อเม็ดแป้งยังไม่ถูกความร้อน จะเห็นรูปกากบาทมีจุดตัดอยู่ที่บริเวณไฮลัมของเม็ดแป้ง เนื่องจากโมเลกุลอะมิโลเพกตินจัดเรียงตัวเป็นผลึกอย่างเป็นระเบียบในแนวตั้งฉากกับผิวเม็ดแป้ง (Zobel, 1988) เมื่อให้ความร้อนจนแป้งเกิดเจลาติไนซ์เซชัน รูปกากบาทในเม็ดแป้งลดลงหรือหายไป เนื่องจากผลึกในเม็ดแป้งถูกทำลายจนทำให้เม็ดแป้งสูญเสียสมบัติของการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ไป (Srirot & Piyachomkwan, 2003)

วิธีการตรวจสอบอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนซ์เซชัน นอกจากศึกษาลักษณะสมบัติของการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ที่เห็นเม็ดแป้งมีลักษณะเป็นรูปกากบาทแล้ว ยังมีวิธีการตรวจสอบอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนซ์ได้อีกหลายวิธี เช่น Kofler hot stage microscope, rapid visco amylograph (RVA), differential scanning calorimeter (DSC) และ X-ray diffraction เป็นต้น (Singh *et al*., 2003)



ภาพที่ 6 ลักษณะเม็ดแป้งมันสำปะหลังในน้ำแป้งที่นำไปต้มที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ในเวลาที่ต่างกัน ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์กำลังขยาย×400 [วงกลมแสดงสมบัติของการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ลักษณะรูปกากบาท] (ดัดแปลงจาก Yotsawimonwat *et al*., 2007)

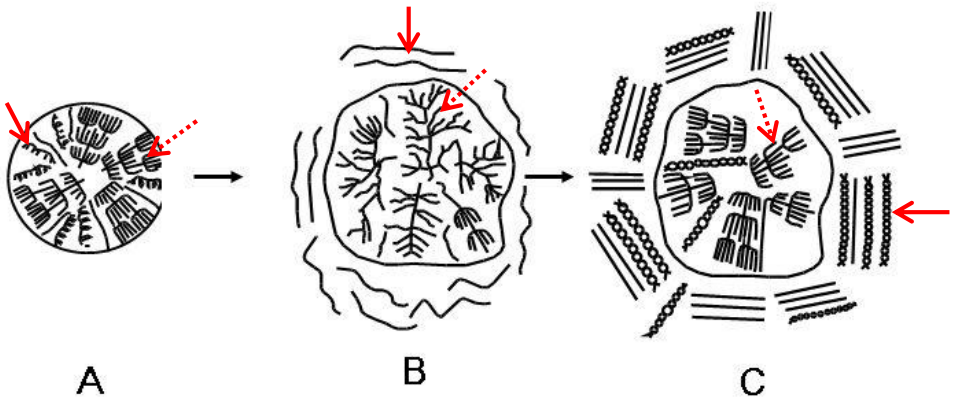
การเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน

แป้งดิบที่อยู่ในรูปเม็ดแป้ง โครงสร้างการจัดเรียงตัวของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินจะอยู่ในรูปกึ่งผลึกที่มีความหนาแน่นและเป็นระเบียบ เมื่อนำแป้งดิบมาใส่น้ำเย็นแป้งดิบจะไม่ละลายน้ำ เนื่องจากความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนจากหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ของโมเลกุลแป้ง (Food-info, 2014)

เมื่อนำน้ำแป้งดิบไปต้มให้ความร้อน ผลจากความร้อนจะทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในเม็ดแป้งดิบที่เรียงตัวกันอย่างหนาแน่นในรูปผลึกให้คลายตัวลง ทำให้โมเลกุลของน้ำเข้าจับกับหมู่ไฮดรอกซิลของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน โดยน้ำจะสามารถเข้าไปแทรกในส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งได้ก่อนส่วนผลึกของเม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งดิบเกิดการดูดน้ำและพองตัวแบบผันกลับได้ (Kaletunc & Breslauer, 2003) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำแป้งให้สูงขึ้นอีกน้ำจะเข้าไปในส่วนผลึกของเม็ดแป้งจากการที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโมเลกุลอ่อนตัวลง เม็ดแป้งดูดน้ำและพองตัวมากขึ้น ความหนืดเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ สายของอะมิโลสส่วนใหญ่ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก จะแพร่ออกมานอกเม็ดแป้งที่พองตัว ทำให้เกือบทั้งหมดภายในเม็ดแป้งจะเหลือโครงสร้างของอะมิโลเพกตินเป็นส่วนใหญ่ (Whistler & James, 1997) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงจนถึงจุดที่เม็ดแป้งเกิดการพองตัวสูงที่สุด เม็ดแป้งก็จะเกิดการแตกออก ความหนืดลดลง ทำให้แป้งสุกโดยกระบวนการที่เรียกว่า เจลาติไนซ์เซชัน

เมื่อลดอุณหภูมิลงโดยการปล่อยแป้งสุกให้เย็นตัวลง โครงสร้างภายในเม็ดแป้งมีอะมิโลเพกตินเกือบทั้งหมด ส่วนอะมิโลสที่แพร่กระจายออกมาอยู่นอกเม็ดแป้ง จะกลับเข้ามาจัดเรียงตัวกันใหม่อย่างมีระเบียบด้วยพันธะไฮโดรเจน

แบบเกลียวคู่ในรูปผลึกที่มีความแข็งแรงกว่าเดิม น้ำที่เคยจับอยู่กับหมู่ไฮดรอกซิล จะถูกดึงออกเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ ลักษณะเป็นเจล เรียกกระบวนการนี้ว่า รีโทรกราเดชัน (retrogradation) (Whistler & Bemiller, 1999) หรือการคืนตัวของแป้ง เมื่อลดอุณหภูมิลงไปอีก ลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะยิ่งแน่นหนามากขึ้น น้ำจะถูกบีบออกจากเจลเรียกว่า ซินเนอร์ริซีส (syneresis) เกิดเป็นโครงร่างผลึกที่มีความแข็งแรงกว่าเดิม (Srirot & Piyachomkwan, 2003) ทำให้แป้งคืนตัวบางชนิด เช่น แป้งในมันฝรั่งต้ม ขนมปัง คอนเฟลค (cornflakes) และพาสต้า (pasta) เป็นต้น มีความทนทานต่อการถูกย่อยโดยเอนไซม์ที่อยู่ในระบบทางเดินอาหาร (Champ *et al*., 1999) รูปแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินในแป้งดิบ แป้งสุกและแป้งคืนตัวแสดงไว้ในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ลักษณะการจัดเรียงตัวของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน

A:แป้งดิบ (native starch หรือ raw starch) B:แป้งสุก (gelatinized starch)

C:แป้งคืนตัว (retrograded starch)

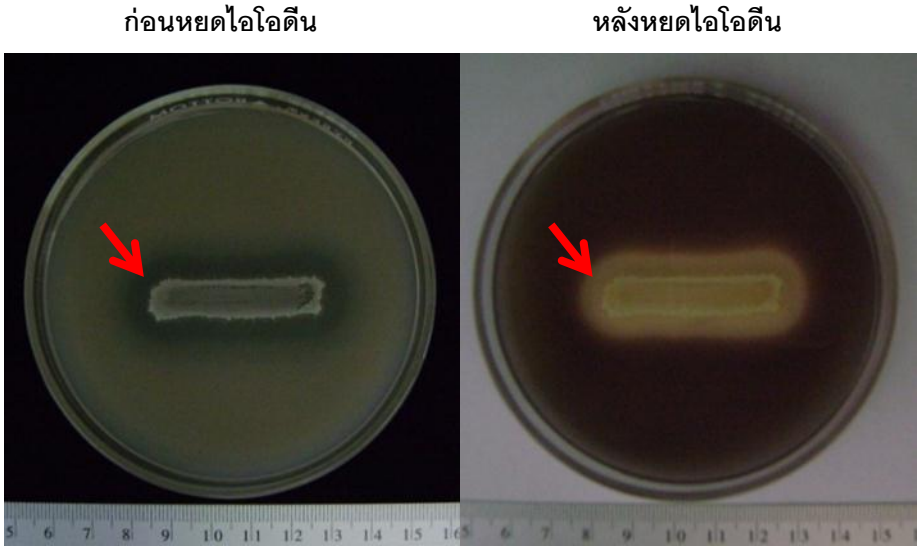
[ลูกศรทึบแสดงการจัดเรียงตัวของอะมิโลส ลูกศรประแสดงการจัดเรียงตัวของอะมิโลเพกติน] (Food-info, 2014)

การย่อยและการดูดซึมแป้ง

แป้งที่มีคุณสมบัติต้านทานการถูกย่อยโดยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารส่วนต้น และไม่ถูกดูดซึมที่ลำไส้เล็ก (small intestine) แต่สามารถผ่านเข้าไปถึงบริเวณลำไส้ใหญ่ (large intestine) และใช้เป็นแหล่งอาหารสำหรับจุลินทรีย์ สุขภาพได้เรียกว่า แป้งต้านทานการย่อย หรือ resistant starch (RS) ซึ่งมีอยู่ 4 ชนิดคือ RS_1 (physically indigestible หรือ physically trapped starch) มีโครงสร้างทางกายภาพเป็นแบบปิด เม็ดแป้งถูกห่อหุ้มอยู่ภายในผนังเซลล์ที่แข็งแรง ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าไปย่อยได้ เมื่อมีการทำลายผนังเซลล์ที่ห่อหุ้มเม็ดแป้งโดยการบด หรือการเคี้ยว ทำให้เอนไซม์สามารถเข้าไปย่อยแป้งได้ เช่น แป้งที่อยู่ในเมล็ดธัญพืช (seed) หรือพืชตระกูลถั่ว (legume), RS_2 (native starch หรือ ungelatinized granule) เป็นแป้งดิบที่เก็บแป้งอยู่ในรูปเม็ดแป้ง มีการเรียงตัวของโครงสร้างผลึกที่ทำให้เม็ดแป้งถูกย่อยด้วยกรดหรือเอนไซม์ได้น้อยกว่าบริเวณอสัณฐาน เช่น แป้งกล้วยดิบ มันฝรั่งดิบ หรือแป้งข้าวโพดที่มีอะมิโลสสูง (high amylose corn starch หรือ Hi-maize), RS_3 (retrograded starch) หรือแป้งคืนตัว ที่มีโครงร่างผลึกที่มีความแข็งแรง

ยิ่งขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการคืนตัวของแป้ง ส่วน RS_4 (chemically modified starch) เป็นแป้งที่ไม่พบตามธรรมชาติ แต่เกิดจากการดัดแปรโครงสร้างโมเลกุลของเม็ดแป้งโดยใช้สารเคมี เพื่อให้แป้งมีความทนทานต่อการถูกย่อยโดยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหาร เช่น สตาร์ชอะซิเตท (starch acetate) ที่มีการดัดแปรแป้งด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (esterification) ทำให้สามารถยับยั้งการคืนตัวของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินหลังเกิดกระบวนการเจลาติไนซ์เซชัน ดังนั้นแป้งที่สามารถต้านทานการถูกย่อยโดยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารส่วนต้น ไม่ว่าจะเกิดจากโครงสร้างตามธรรมชาติหรือเกิดจากการถูกดัดแปรโครงสร้างของแป้ง ล้วนแล้วแต่เป็นข้อจำกัด ที่ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าไปย่อยแป้งได้ (Englyst *et al*., 1992)

จากการศึกษาของ Rathithammatorn และคณะ พบว่า *Lactobacillus amylovorus* TISTR 1110 ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่จัดอยู่ในกลุ่มอะมิโลไลติคแลกติกแอซิดแบคทีเรีย (amylolytic lactic acid bacteria) สามารถเจริญเติบโตได้ดีบนอาหารแข็งที่มีแป้งข้าวเหนียวดิบเป็นแหล่งคาร์บอนแทนกลูโคส (starch agar) และมีความสามารถในการย่อยแป้งข้าวเหนียวดิบได้จนเกิดวงใส (clear zone) ดังแสดงในภาพที่ 8 ซึ่งเกิดจากการที่ *L. amylovorus* สามารถสร้างเอนไซม์อัลฟาอะมิเลสภายนอกเซลล์ (extracellular amylase) ที่มีความเฉพาะเจาะจงในการย่อยแป้งดิบได้บางชนิดเท่านั้น (Nakamura, 1981)



ภาพที่ 8 ความสามารถของ *L. amylovorus* ในการย่อยแป้งข้าวเหนียวดิบ [ลูกศรแสดงวงใส (clear zone)] (Ratithammatorn *et al*., 2012)

นอกจากนี้ยังมีปลาน้ำจืดบางชนิดที่สามารถย่อยแป้งดิบได้ แต่ความสามารถในการย่อยแป้งดิบของปลาแต่ละชนิดจะแตกต่างกันโดยพบว่า ปลานิลและปลาดุกสามารถย่อยแป้งสาลีดิบได้ 61% และ 60% ในขณะที่ย่อยแป้งข้าวโพดดิบได้เพียง 45% และ 26% ตามลำดับ ส่วนปลาไหลสามารถย่อยแป้งสาลีดิบได้ดีที่สุด ย่อยแป้งข้าวโพด ข้าวฟ่างได้

รองลงมาและย่อยแป้งมันฝรั่งได้น้อยที่สุด ความสามารถในการย่อยแป้งดิบของปลาน้ำจืดแต่ละชนิด จึงมีประโยชน์ในการนำไปปรับปรุงใช้ในการทำสูตรอาหารปลา เพราะปลาสามารถย่อยแป้งดิบได้และถูกดูดซึมเข้าไปใช้ประโยชน์ในการเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว (Degani *et al*.,1986) จึงเป็นไปได้ว่า ปลาน้ำจืดกลุ่มนี้อาจจะสามารถสร้างเอนไซม์ย่อยแป้งดิบ (raw starch degrading amylolytic enzyme) บางชนิดได้

ส่วนทางด้านอุตสาหกรรมได้มีการใช้เอนไซม์ ENZ_Cas ซึ่งเป็นมัลติเอนไซม์ (multi enzyme) ที่ประกอบด้วยเอนไซม์กลุ่มที่สามารถย่อยพอลีแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง (non-starch polysaccharide hydrolyzing enzyme) ซึ่งหมายรวมถึงเอนไซม์เซลลูเลส เพกติเนสและเฮมิเซลลูเลส ส่วนอีกกลุ่มคือ เอนไซม์ย่อยแป้งดิบจากสายพันธุ์ราในกลุ่ม Aspergillus ซึ่งคัดเลือกจาก BIOTEC Culture Collection ที่สามารถย่อยวัตถุดิบจากมันสำปะหลัง เช่น หัวมันสดบด มันเส้นและกากมันสำปะหลัง ให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ต้องใช้ความร้อนในการทำให้เกิดการสุกของแป้ง อาศัยกระบวนการที่เรียกว่า non-thermal hydrolysis and saccharification process ซึ่งกระบวนการนี้อาศัยการทำงานร่วมกันของมัลติเอนไซม์ ในการย่อยสลายผนังเซลล์ที่กักเก็บเม็ดแป้งไว้ ทำให้เม็ดแป้งถูกปล่อยออกมา และถูกย่อยโดยเอนไซม์ย่อยแป้งดิบกลุ่มนี้ ได้ผลิตผลเป็นน้ำตาลมากกว่า 80% (มากกว่า 800 มิลลิกรัมของน้ำตาลรีดิวซ์/กรัมของวัตถุดิบโดยน้ำหนักแห้ง) (Office of Technology Promotion and Transfer, 2009)

แป้งสุกเมื่อผ่านกระบวนการเจลาติไนซ์ เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในโมเลกุลของเม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งเกิดการแตกออกเป็นการช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวทำให้แป้งสามารถสัมผัสกับเอนไซม์ได้มากขึ้น (Couto *et al*., 2008) แป้งสุกจะถูกย่อยครั้งแรกในปาก โดยเอนไซม์อัลฟาอะมิเลสหรือไทยาลิน (ptyalin) ที่สร้างมาจากต่อมน้ำลาย (salivary gland) มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH; Potential of hydrogen ion) ประมาณ 6.7 ซึ่งเอนไซม์อัลฟาอะมิเลสไม่สามารถย่อยแป้งดิบได้ ผลจากการย่อยแป้งจะได้เด็กซ์ตริน (dextrin) ที่มีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่าแป้งแต่ใหญ่กว่าน้ำตาล โดยเด็กซ์ตรินจะถูกย่อยต่อไปได้ไดแซ็กคาไรด์คือ maltose เนื่องจากอาหารส่วนใหญ่จะถูกเคี้ยวและอยู่ในปากเป็นช่วงเวลาสั้นๆ ดังนั้นแป้งส่วนใหญ่ที่เหลือต้องถูกส่งไปย่อยต่อเมื่ออาหารถูกกลืนลงสู่กระเพาะอาหาร เนื่องจากค่าความเป็นกรดของน้ำย่อยบริเวณกระเพาะอาหารมีค่าประมาณของ pH น้อยกว่า 4 ทำให้เอนไซม์อัลฟาอะมิเลสในน้ำลาย ถูกยับยั้งไม่ให้ย่อยแป้งที่อยู่ในกระเพาะอาหารได้ เมื่อแป้งถูกส่งผ่านต่อเข้าไปยังบริเวณลำไส้เล็ก จะถูกย่อยต่อโดยเอนไซม์อัลฟาอะมิเลสที่หลั่งออกมาจากตับอ่อน (pancreatic amylase) ที่หลั่งเข้าสู่ลำไส้เล็กบริเวณดูโอดินัม (duodenum) ได้ผลจากการย่อยแป้งคือโอลิโกแซ็กคาไรด์ (oligosaccharide) ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยโมโนแซ็กคาไรด์ตั้งแต่ 2-20 โมเลกุลเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก เช่น ไดแซ็กคาไรด์ (disaccharide) ไตรแซ็กคาไรด์ (trisaccharide) และอัลฟาลิมิตเด็กซ์ตริน (**α**-limit dextrins) กลุ่มโอลิโกแซ็กคาไรด์จะถูกย่อยต่อโดยเอนไซม์ที่สร้างจากเซลล์เยื่อเมือก (mucosal cell) ของลำไส้เล็ก ได้กลูโคสที่เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ที่จะถูกดูดซึมผ่านเซลล์เยื่อเมือกของลำไส้เล็กบริเวณที่มีลักษณะคล้ายขนแปรงเล็กๆ (microvilli) เข้าสู่หลอดเลือดดำ (portal vein) ซึ่งเป็นหลอดเลือดดำที่นำเลือดมาจากระบบทางเดินอาหารเพื่อเข้าสู่ระบบไหลเวียนเลือดที่ตับต่อไป (Barrett *et al*., 2010)

เมื่อแป้งสุกถูกปล่อยทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงจากกระบวนการรีโทรกราเดชันหรือการคืนตัวของแป้ง ทำให้แป้งมีการจัดเรียงตัวของโครงร่างผลึกที่มีความแข็งแรงกว่าเดิม แป้งคืนตัวถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มแป้งต้านทานการย่อยประเภทที่ 3

(RS_3) จากคุณสมบัติที่แป้งคืนตัวมีความทนทานต่อการถูกย่อยโดยเอนไซม์ที่อยู่ในระบบทางเดินอาหารส่วนต้น และไม่ถูกดูดซึมบริเวณลำไส้เล็ก จึงสามารถผ่านเข้าไปที่บริเวณลำไส้ใหญ่ได้เช่นเดียวกับเซลลูโลส อินนูลิน และฟรุกโตโอลิโกแซ็กคาไรด์ (Wrong, 1981) ซึ่งจะถูกจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่บริเวณลำไส้ใหญ่หลากหลายชนิด ใช้เป็นสารตั้งต้นในการเกิดกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic fermentation) โดยจุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์ออกมาย่อยสารกลุ่มดังกล่าว ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สำคัญคือ กรดไขมันชนิดสายสั้น (short chain fatty acid) เช่น อะซิเตท (acetate: C_2), โพรพิโอเนต (propionate: C_3) และบิวไทเรต (butyrate: C_4) (Ewing & Cole, 1994) ทำให้ลำไส้ใหญ่มีสภาพเป็นกรด จึงมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ก่อโรค (pathogenic bacteria) เช่น Salmonella, Escherichia coli แต่กลับมีผลกระตุ้นการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์สุขภาพ เช่น Lactobacillus หรือ Bifidobacterium ที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย (Cummings & Macfarlane, 2002)

สรุป

แป้งดิบ จะถูกเก็บไว้ในเม็ดแป้ง การที่เม็ดแป้งดิบถูกกระทำด้วยความร้อน จะส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพของแป้ง ให้ถูกเปลี่ยนเป็นแป้งสุก ทำให้เอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารสามารถย่อยแป้งได้ง่ายขึ้น จึงมีผลดีต่อระบบการดูดซึมน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่ลำไส้เล็กเข้าสู่กระแสเลือด เพื่อนำไปใช้เป็นพลังงานของร่างกาย ส่วนแป้งสุก เมื่อถูกปล่อยทิ้งไว้ให้เย็นตัวลง จะเปลี่ยนเป็นแป้งคืนตัวที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแป้ง เพื่อจัดระเบียบโครงสร้างใหม่ให้มีการเรียงตัวที่หนาแน่นยิ่งขึ้น จึงทำให้แป้งคืนตัวมีความทนทานต่อการถูกย่อยโดยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารส่วนต้นและไม่ถูกดูดซึมที่ลำไส้เล็ก แต่สามารถผ่านเข้าไปถึงบริเวณลำไส้ใหญ่ และสามารถใช้เป็นแหล่งอาหารจุลินทรีย์สำหรับจุลินทรีย์สุขภาพที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย ปัจจุบัน แป้งคืนตัวจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ที่กำลังได้รับการพัฒนาในรูปแบบอาหารเสริมเพื่อสุขภาพ สำหรับผู้ที่สนใจและนิยมบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพ ในการเสริมสร้างความแข็งแรงต่อระบบทางเดินอาหารบริเวณลำไส้ใหญ่

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรงวุฒิ ยศวิมลวัฒน์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์เภสัชกรรม คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์มอบเนื้อหาและภาพประกอบลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งมันสำปะหลังดิบที่ให้ความร้อน เพื่อให้บทความมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

Arora, A.S. (2012). *Why is the starch-iodine complex intense blue in colour?*. Iodimetric and iodometric titrations!. Retrieved May 9, 2016, from http://knowledgepayback.blogspot.com/2012/04/iodimetric-iodometric-titrations.html

Barrett, K.E., Barman, S.M., Boitano, S., & Brooks, H.L. (2010). *Ganong's review of medical physiology* (23rd Ed.). USA: McGraw-Hill.

Champ, M., Marti, L., Noah, I., & Gratas, M. (1999). Analytical methods for resistant starch. *Complex carbohydrates in food* (pp.169-187). New York: Marcel Dekker.

Chaplin, M. (2014). *Starch*. Water structure and science. Retrieved May 9, 2016, from http://www1.lsbu.ac.uk/water/hysta.html

Collison, R. (1968). Swelling and gelation of starch. *Starch and it derivatives* (pp.168-193). London-Chapman :Hall Ltd.

Couto, A., Enes, P., Peres, H., & Oliva, T.A. (2008). Effect of water temperature and dietary on growth and metabolic utilization of diets in gilthead sea bream (*Sparusaurata*) juveniles. *Comparative Biochemistry and Physiology*. Part A *151*, 45-50.

Cummings, J.H., & Macfarlane, G.T. (2002). Gastro intestinal effects of prebiotics. *British Journal of Nutrition, 87* (Suppl), S145-151.

Degani, G., Viola, S., & Levanon, D. (1986). Effects of dietary carbohydrate sources on growth and body composition of the European eel (*Anquillaanquilla L.*). *Aquaculture*, *52*, 97-104.

Donald, A.M., Waigh, T.A., Jenkins, P.J., Gidley, M.J., Debet, M., & Smith, A. (1997). Internal structure of starch granules revealed by scattering studies. *The royal society of chemistry* (pp.173-179), United Kingdom: Cambridge University Press.

Englyst, H.N., Kingman, S.M., & Cummings, J.H. (1992). Classification and measurements of nutritionally important starch fraction. *European Journal of Clinical Nutrition*, *46*(2), S33-50.

Ewing, W. & Cole, D.J.A. (1994). The living gut: an introduction to micro-organisms in nutrition. Ireland: Dungannon.

Food-info. (2014). *Gelatinization and retrogradation of starch*. Retrieved May 9, 2016, from http://www.food-info.net/uk/carbs/starch.htm

Gibson,T.S., Solah, V. A., & Mccleary, B.V. (1997). A procedure to measure amylase in cereal starches and flour with concanavalin. *Cereal Science*, *25*(2), 111-119.

Kaletunc, G., & Breslauer,K.J. (2003). Characterization of cereals and flours: properties, analysis, and applications. *Food science and technology*. New York: Marcel Dekker.

Kerr, R.W. (1950). *Chemistry and industry of starch* (2nd Ed.). (pp.791). New York-Academic Press.

Nakamura, L.K. (1981). *Lactobacillus amylovorus*, a new starch hydrolyzing species from cattle waste-corn fermentation. *International Journal of Systemic Bacteriology*, *31*, 56-63.

Oates, C.G. (1996). Physical modification of starch. *In advanced post academic course on tapioca starch technology* (pp.19-23).

Office of Technology Promotion and Transfer. (2009). *Technology for supporting and developing quality of life*. Retrieved May 9, 2016, from http://library.dip.go.th/Industrial%20Innovation/www/pro_det5-009.html.

Pornchaloempong, P., & Rattanapananon, N. (2010). *Gelatinization temperature*. Retrieved May 9, 2016, from http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1009/gelatinization-temperature

Ratithammatorn, T. (2010). *Development of colon-specific starch delivery system as nutraceutical product.* Doctor of Philosophy in Pharmacy, Chiang Mai University.

Ratithammatorn, T., Thongwai,N., Yotsawimonwat, S., Sirithunyalug,B., & Sirithunyalug J. (2012). Adhesion and utilization of starch granules by *Lactobacillus amylovorus*. *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences*, *11*(1), 29-42.

Singh, N., Singh, J.,Kaur,L N., Sodhi, N.S.,& Gill, B.S. (2003). Morphological, thermal and rheological properties of starch from different botanical sources. *Food Chemistry*, *81*, 219-231.

Srirot, K., & Piyachomkwan, K. (2003). *Technology of starch* (3th Ed.). Bangkok: Kasetsart University.

Takahashi,S., & Seib, P.A. (1988). Paste and gel properties of prime corn and wheat starches with and without native lipids. *Cereal Chemistry*, *65*, 474-483.

Tester, R.F. (1997). Starch: the polysaccharides fractions. *The Royal Society of Chemistry* (pp. 163-171). London: United Kingdom.

Whistler, R. L., & James, N. B. (1997). Starch. *Carbohydrate Chemistry for Food Scientists*, *49*, 330.

Whistler, R. L., & Bemiller, J.N. (1999). *Carbohydrate chemistry for food scientist American association of cereal chemists*. St. Paul: MN.

Wils, R. (2011). 03-saving calories-why this doesn't work. *Nutritional Biochemistry*. Retrieved May 9, 2016, from http://nutritionalbiochem.blogspot.com/2011/08/03-saving-calories-why-this-doesnt-work.html

Wrong, O.M. (1981). *The large Intestine, its role in mammalian nutrition and homeostasis*. New York: Halsted.

Yotsawimonwat, S., Sirithunyalug, J., Tipduangta, P., Kawevichit, S., & Sirithunyalug, B. (2007). Preparation of new tablet multipurpose excipient from tapioca starch, Department of Pharmaceutical Science, Faculty of Pharmacy, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand. 41, 45.

Zobel, H.F. (1988). Molecules to granules: A comprehensive starch review. *Starch/Staerke*, *40,* 1-7.