

บทที่ 2 ทฤษฎีและตรวจเอกสาร

2.1 องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างของเม็ดแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในคลอโรพลาสต์และในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งอาหาร เช่น เมล็ดและหัว คำว่า “แป้ง” ในการผลิตนั้นหมายถึงคาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ มีสิ่งเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ ฟอสฟอรัส และสารอินทรีย์อื่นๆ น้อยมาก ส่วนแป้งที่ผลิตโดยทั่วไปที่ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ อยู่มาก เรียกว่า ฟลาวร์ (flour) แป้งมีสูตรทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ มีความชื้นประมาณ 10-20% แป้งแต่ละชนิดมีส่วนประกอบและโครงสร้างที่ต่างกันจึงทำให้แป้งมีสมบัติทางโภชนาการ ทางกายภาพ ทางเคมี และทางเคมีกายภาพต่างกันด้วย

2.1.1 แป้ง (Starch)

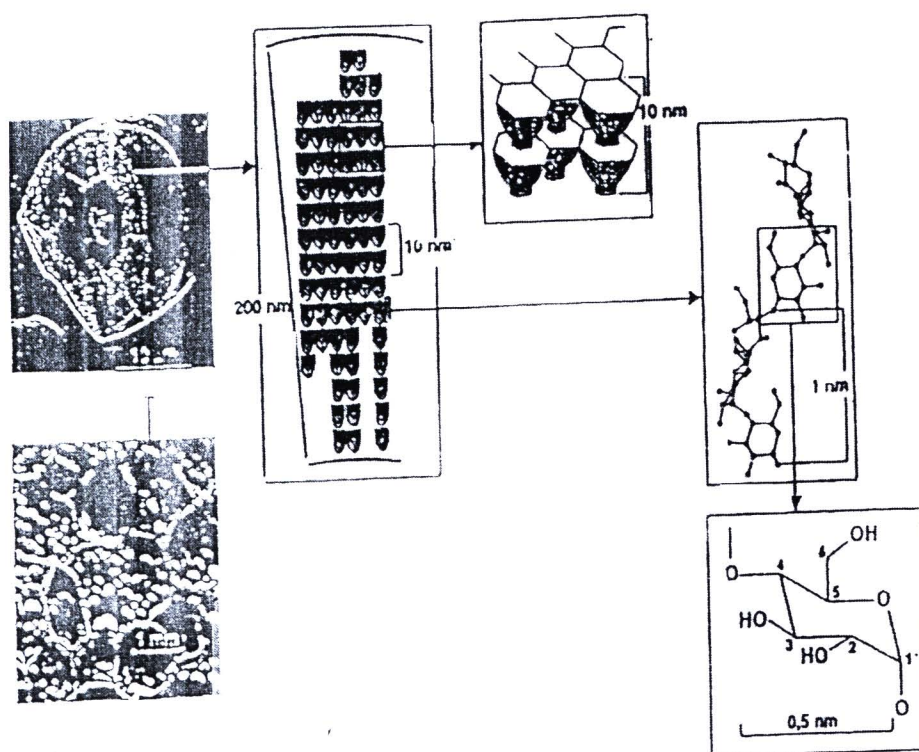
แป้งหรือสทาร์ช (starch) เป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตพอลิแซ็กคาไรด์ที่เป็นโพลิเมอร์ของน้ำตาลมอนโอไดรอกูโคส ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายโพลิเมอร์ที่มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group) เรียกว่าปลายรีดิวซิง (reducing end group) แป้งประกอบด้วยโพลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ โพลิเมอร์เชิงเส้น (อะไมโลส) และโพลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะไมโลเพกทิน) แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกทินแตกต่างกันดังตารางที่ 2.1 ทำให้คุณสมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน

ในสภาพธรรมชาติโมเลกุลแป้งจะจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นอยู่ภายในเม็ดแป้ง (starch granule) โดยจับยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (H-bond) ทั้งภายในและระหว่างโมเลกุล รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแป้งภายในเม็ดแป้งมันฝรั่ง

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน

อะไมโลส	อะไมโลเพคติน
1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะ α -1,4	1. โมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันมีกิ่งก้านสาขาเหมือนกิ่งไม้ด้วยพันธะ α -1,4 และ α -1,6
2. ประกอบด้วยกลูโคส 200-2,000 หน่วย	2. แต่ละกิ่งมีกลูโคส 20-25 หน่วย
3. ละลายน้ำได้ดีกว่า	3. ละลายน้ำได้น้อยกว่า
4. เมื่อต้มในน้ำจะมีความข้นหนืดน้อย	4. ข้นหนืดมากและใส
5. ให้สีน้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน	5. ให้สีม่วงแดงหรือสีน้ำตาลแดงกับสารละลายไอโอดีน
6. ต้มแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็งได้	6. ไม่จับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง

ที่มา : Bey และ Roels (1985)



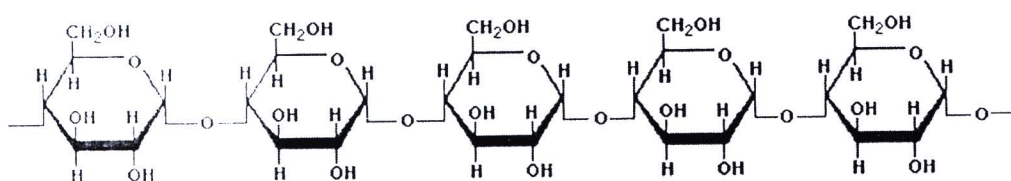
รูปที่ 2.1 โครงสร้างภายในเม็ดแป้งมันฝรั่ง

ที่มา : Sander (1996)

โมเลกุลแป้งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ ตามขนาดโมเลกุลและลักษณะการจัดเรียงตัว คือ อะไมโลสและอะไมโลเพคติน อะไมโลสมีลักษณะเป็นโพลิเมอร์สายตรงเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4 glycosidic linkage มีขนาดเล็กและมีกิ่งก้านสาขาเพียงเล็กน้อย ส่วนอะไมโลเพคตินมีขนาดใหญ่และมีกิ่งก้านสาขามากมาย นอกจากนี้ยังพบโมเลกุลแป้งอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอะไมโลสแต่เล็กกว่าอะไมโลเพคตินเรียกว่า “Intermediate Material” แต่พบในปริมาณไม่มากนัก

2.1.1.1 อะไมโลส (Amylose)

อะไมโลสเป็นโพลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 500-6,000 หน่วย ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4 - glycosidic linkage (รูปที่ 2.2) แป้งแต่ละชนิดมีปริมาณของอะไมโลสที่แตกต่างกันออกไป แป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวโพด แป้งข้าวสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมโลสสูง (ประมาณ 25-35%) แป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาเก มีปริมาณอะไมโลสต่ำกว่า (ประมาณ 15-20%) น้ำหนักของอะไมโลสอยู่ในช่วง 10^4 ถึง 10^6 ดาลตัน ซึ่งอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมีขนาดโมเลกุลของอะไมโลสอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีซึ่งมีขนาดโมเลกุลของอะไมโลสอยู่ในช่วง 200 ถึง 1,200 แป้งที่มีโมเลกุลของอะไมโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรดชัน (retrogradation) ลดลง (Hizukuru, 1988)

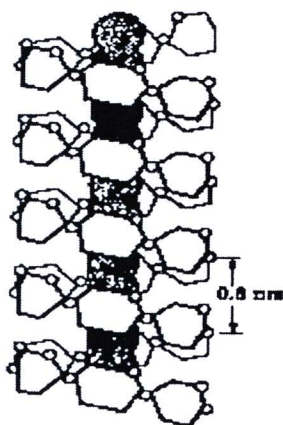


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะไมโลส

ที่มา: <http://www.scientificpsychic.com>

อะไมโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนและสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น butanol, fatty acid, surfactant, phenol และ hydrocarbon สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้ไม่ละลายในน้ำ โดยอะไมโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์ (Galliard และ Bowler, 1987) ดังรูปที่ 2.3

อะไมโลสที่รวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงิน ซึ่งใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีองค์ประกอบของอะไมโลส



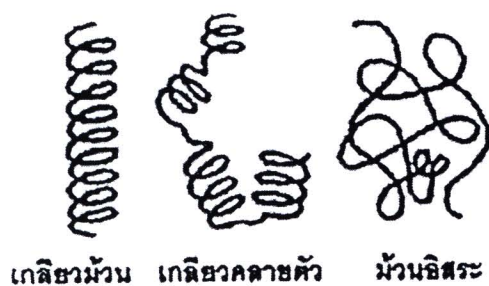
รูปที่ 2.3 ภาพจำลองการจับตัวของอะไมโลสกับสารอินทรีย์

ที่มา : Galliard และ Bowler (1987)

ตำแหน่งของอะไมโลสภายในเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแป้ง อะไมโลสบางส่วนแทรกอยู่ในกลุ่มของอะไมโลเพกติน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (amorphous) และส่วนผลึก (crystallite) ในแป้งสาลีพบอะไมโลสอยู่ในส่วนอสัณฐาน ในแป้งมันฝรั่งพบอะไมโลสอยู่ร่วมกับอะไมโลเพกตินในส่วนผลึก จากการศึกษาการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งมันฝรั่งบ่งชี้ว่าอะไมโลสกระจายอยู่ในส่วนรอบนอกของเม็ดแป้งมากกว่าที่จะอยู่ในส่วนใจกลางเม็ดแป้ง (Jane และ Shen, 1993) อะไมโลสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่จะพบเป็นเกลียวคู่กับอะไมโลเพกตินอยู่ใจกลางเม็ดแป้ง ส่วนอะไมโลสขนาดเล็กจะพบอยู่ตามขอบเม็ดแป้ง (Oates, 1996) จากการศึกษาตำแหน่งของอะไมโลสในแป้งข้าวโพดและแป้งมันฝรั่งโดยการดัดแปรแป้งด้วยวิธีการโครสลิงค์ บ่งชี้ว่าอะไมโลสกระจายอยู่ทั่วไปในส่วนของอะไมโลเพกตินมากกว่าที่จะอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม (Jane และคณะ, 1992; Kasemsuwan และ Jane, 1994)

โครงสร้างของอะไมโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (helix) เกลียวที่คลายตัว (interrupted helix) หรือม้วนอิสระ (random coil) ดังรูปที่ 2.4 ในสารละลายที่อุณหภูมิห้อง อะไมโลสอยู่ในลักษณะเป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คลายตัว อะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 6,500 ถึง 160,000 มีโมเลกุลเป็นม้วนอิสระและไม่ละลายในสารละลาย สำหรับอะไมโลสที่มี

น้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 อาจจะมีบางส่วนละลายได้ โมเลกุลจะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง (Whistler และ Daniel, 1984)

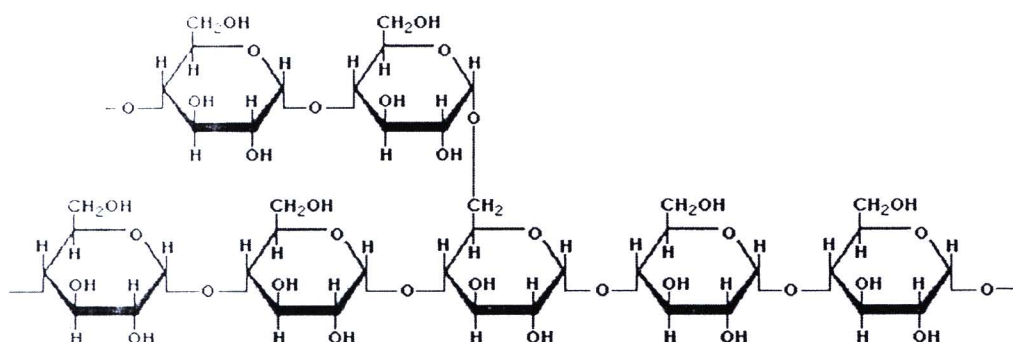


รูปที่ 2.4 ลักษณะเกลียวของอะไมโลส

ที่มา: Whistler และ Daniel (1984)

2.1.1.2 อะไมโลเพกติน (Amylopectin)

อะไมโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นสายตรงเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1,4 (α -1,4 -glycosidic linkage) และจุดที่แตกกิ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1,6 (α -1,6 -glycosidic linkage) สายโซ่กิ่งประกอบด้วยกลูโคสในช่วง 6 ถึง 100 หน่วย ลักษณะโมเลกุลของอะไมโลเพกตินแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของอะไมโลเพกติน

ที่มา: <http://www.scientificpsychic.com>

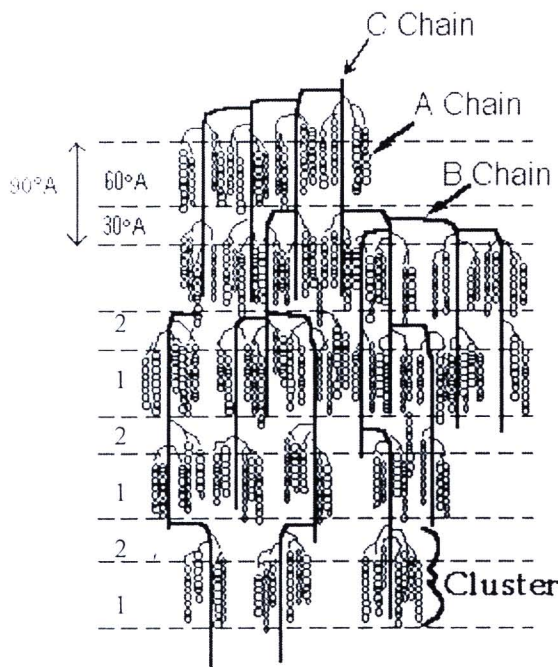


หน่วยกลูโคสที่มีพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1,6 -glycosidic linkage มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสทั้งหมดในอะไมโลเพกติน ขนาดโมเลกุลของอะไมโลเพกตินจะอยู่ในช่วง 5,000 ถึง 40,000 หน่วยกลูโคส อะไมโลเพกตินมีอัตราในการคืนตัวต่ำเนื่องจากมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง

โครงสร้างแบบกิ่งของอะไมโลเพกตินประกอบด้วยสาย (chain) 3 ชนิด คือ

- 1) สาย A (A-chain) เป็นสายที่เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว
- 2) สาย B (B-chain) เป็นสายที่เชื่อมต่อกับสายอื่นๆ 2 สาย หรือมากกว่า
- 3) สาย C (C-chain) เป็นสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ ในอะไมโลเพกตินแต่ละโมเลกุลประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น

ขนาดสายโซ่ของอะไมโลเพกตินมีตั้งแต่ขนาดเล็กซึ่งมี DP ประมาณ 6 หน่วย ไปจนถึงสายยาวที่มี DP 100 หน่วยหรือมากกว่า โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 20-30 หน่วย Robin และคณะ (1974) ศึกษาโครงสร้างอย่างละเอียดของอะไมโลเพกตินโดยใช้เอนไซม์ที่ย่อยพันธะกิ่ง (debranching enzyme) และ β -amylase ย่อยอะไมโลเพกตินจากมันฝรั่ง พบว่าโครงสร้างของอะไมโลเพกตินประกอบด้วย 2 ส่วนคือส่วนที่มีการจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบหรือส่วนผลึก เรียกว่า crystallite region และส่วนที่ไม่เป็นระเบียบหรือส่วนอสัณฐาน เรียกว่า amorphous region แสดงดังรูปที่ 2.6



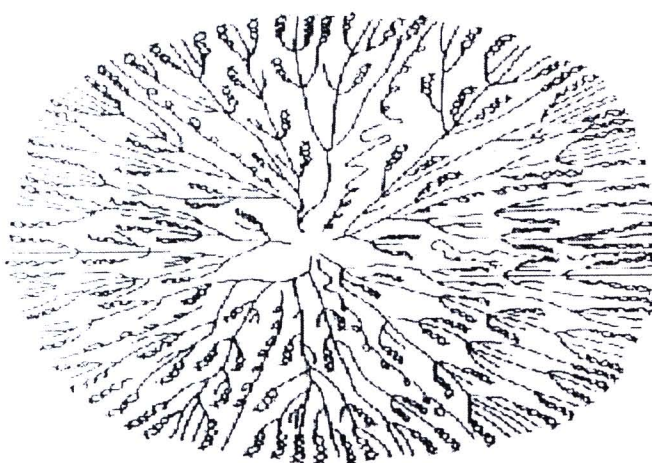
รูปที่ 2.6 ลักษณะโครงสร้างอะไมโลเพกตินที่ประกอบด้วยส่วนผลึกและส่วนอสัณฐาน

1= ส่วนผลึก 2 = ส่วนอสัณฐาน ที่มา: Robin และคณะ (1974)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	
ห้องสมุดงานวิจัย	
วันที่ 13	ธ.ค. 2555
เลขทะเบียน	246673
เลขเรียกหนังสือ	

ภายในเมดัลแบ่งประกอบด้วยวงแหวนหนาแน่นที่เรียกว่า growth ring ซึ่งสังเกตได้จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ เมดัลแบ่งที่มีขนาดใหญ่ในสภาพเปียกและสดจะสังเกตเห็นวงแหวนได้ง่าย ส่วนในสภาพที่แห้งจะไม่พบวงแหวน สำหรับเมดัลแบ่งที่มีขนาดเล็ก เช่น แป้งข้าวบาร์เลย์และแป้งข้าวเจ้าจะสังเกตจากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้ยาก แต่สามารถสังเกตเห็นได้เมื่อนำแป้งมาผ่านปฏิกิริยาเคมีหรือย้อมด้วยไอโอดีนและศึกษาด้วยกล้อง SEM (French, 1984) จากโครงสร้างของวงแหวนแสดงให้เห็นถึงลักษณะการเจริญของเมดัลแบ่ง โดยเนื้อเยื่อชั้นแรกจะเจริญมาจากศูนย์กลางของเมดัลแบ่ง (hilum) ซึ่งส่วนนี้ประกอบด้วยส่วน reducing end ของโมเลกุลแป้ง และมีส่วนที่เป็น non-reducing end ของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินแผ่กระจายออกไป (Oates, 1997) จุดเชื่อมกิ่ง (branch point) ของอะไมโลเพกตินอยู่ในส่วนออสัญฐานและสายโซ่อยู่ในส่วนผลึก (French, 1984)

แบบจำลองของเมดัลแบ่งซึ่งประกอบด้วยอะไมโลเพกติน แสดงดังรูปที่ 2.7 ในแบบจำลองนี้แสดงถึงลักษณะเกลียวคู่ของอะไมโลเพกตินที่รวมกันเป็นผลึก รวมทั้งส่วนของอะไมโลสที่อยู่อย่างอิสระหรืออยู่ร่วมกับไขมันในลักษณะเป็นเกลียวซึ่งจะพบในแป้งจากธัญพืช (Lineback, 1984) ปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพกตินในแป้งแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.7 แบบจำลองโครงสร้างอะไมโลสและอะไมโลเพกตินในแป้งจากธัญพืช
ที่มา : Lineback (1984)

ตารางที่ 2.2 ปริมาณและคุณสมบัติของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินในแป้งแต่ละชนิด

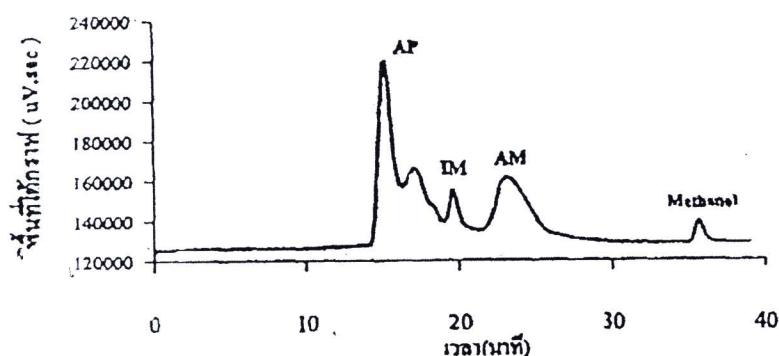
	แป้งมัน ฝรั่ง	แป้ง ข้าวโพด	แป้งสาลี	แป้งมัน สำปะหลัง	แป้งข้าวโพด ข้าวเหนียว
อะไมโลส (% น.น.แห้ง)	21	28	28	17	0
อะไมโลเพกติน (%น.น.แห้ง)	79	72	72	83	100
DP อะไมโลส	3,000	800	800	3,000	-
DP อะไมโลเพกติน	2x10 ⁶	2x10 ⁶	2 x 10 ⁶	2 x 10 ⁶	2 x 10 ⁶
จำนวนโมเลกุลอะไมโลส (x10 ²⁰) ในแป้ง 1 กรัม	30	130	130	20	0
จำนวนโมเลกุลอะไมโล เพกติน(x10 ¹⁷) ในแป้ง 1 กรัม	150	130	130	150	190
สัดส่วนจำนวนโมเลกุลของ อะไมโลสต่ออะไมโลเพกติน	200	1,000	1,000	150	0
DPเฉลี่ยของโมเลกุลแป้ง	14,000	3,000	3,000	18,000	2,000,000

ที่มา : Swinkels (1985)

2.1.1.3 สารตัวกลาง (Intermediate material)

สารตัวกลางมีเพียงส่วนน้อยในแป้งบางชนิด มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะไมโลเพกตินแต่ใหญ่กว่าอะไมโลส (Rupp และ Schwartz, 1988) และเมื่อตรวจสอบด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (¹³C Nuclear Magnetic Resonance) พบว่าสารตัวกลางในแป้งสาลีจะมีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกับอะไมโลเพกตินแต่มีกิ่งที่สั้นกว่า (Dais และ Perlin, 1982) นอกจากนี้มีรายงานว่าสารตัวกลางในแป้งข้าวโอ๊ตสามารถเกิดสีน้ำเงินกับไอโอดีนได้เช่นเดียวกับอะไมโลสแต่มีค่า iodine affinity และค่า blue value ต่ำกว่าอะไมโลสแต่มากกว่าค่าของอะไมโลเพกติน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารตัวกลางนี้มีโครงสร้างเป็นลักษณะเชิงกิ่งเช่นเดียวกับอะไมโลเพกติน ปริมาณและโครงสร้างของสารตัวกลางขึ้นอยู่กับชนิดและอายุการเก็บเกี่ยวของพืช (Guilbot และ Mercier, 1985) จากการตรวจสอบองค์ประกอบของแป้งโดยใช้เทคนิคโครมาโตกราฟีแบบจำเพาะขนาด (High Performance Size Exclusion Chromatography; HPSEC) (กล้านรงค์ ศรีรัฐ และคณะ. 2541) สามารถแยกองค์ประกอบของแป้งตามน้ำหนักโมเลกุลได้ 3 ส่วนคือ อะไมโลส อะไมโลเพกติน และสารตัวกลาง โดยองค์ประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากจะออกจาก

เครื่อง HPSEC ก่อน ดังรูปที่ 2.8 ปรากฏเป็นพีคของอะไมโลเพคติน สารตัวกลางและอะไมโลส สัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุลจากมากไปน้อยตามลำดับ อย่างไรก็ตาม มีบางรายงานกล่าวว่าสารตัวกลางที่พบในแป้งอาจเป็นผลมาจากวิธีที่ใช้ในการแยกองค์ประกอบของแป้ง (Testu และ Karkalas, 1996)



รูปที่ 2.8 โครมาโตแกรมของแป้งมันสำปะหลังสายพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50

AM: amylose, IM: intermediate material, AP: amylopectine

ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และคณะ (2541)

2.1.1.4 ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเมล็ดแป้ง

1. ไขมัน (Lipid)

โดยส่วนใหญ่แป้งจะมีองค์ประกอบของไขมันอยู่ต่ำกว่า 1% ชนิดของไขมันที่อยู่ในแป้งมีผลต่อคุณสมบัติของแป้ง แป้งจากหัว (tuber) หรือราก (root) เช่น แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณไขมันในปริมาณที่ต่ำ (0.1% หรือน้อยกว่า) เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งจากธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวฟ่าง ซึ่งมีไขมันประมาณ 0.6-0.8% (w/w) การมีไขมันในแป้งจะมีผลต่อคุณสมบัติของแป้งเนื่องจากไขมันจะเกิดการรวมตัวกับอะไมโลสในแป้งเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขึ้นในเมล็ดแป้ง ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนนี้ไม่ละลายน้ำแต่จะถูกทำลายเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 120 องศาเซลเซียส) พันธะที่ยึดเหนี่ยวกันถูกทำลายทำให้อะไมโลสสามารถละลายออกมาได้ สารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสและไขมันจะมีผลทำให้กำลังการพองตัว (swelling power) และค่าการละลาย (solubility)

ของแป้งลดลง (Davies และคณะ, 1980) นอกจากนี้สารไขมันยังทำให้แป้งเกิดการเหม็นหืน (rancid) ขณะเก็บรักษาด้วย

2. โปรตีน (Protein)

แป้งมีปริมาณโปรตีนอยู่ต่ำกว่า 1% โดยโปรตีนจะเกาะอยู่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้ง ทำให้เกิดผลกระทบต่อลักษณะของแป้ง คือ ทำให้เกิดประจุบนพื้นผิวเม็ดแป้ง มีผลต่อการกระจายของเม็ดแป้ง ทำให้แป้งมีการดูดซับน้ำ การพองตัว และการเกิดเจลลิตีในซึ่เปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ยังทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction) จากการทำปฏิกิริยาของกรดอะมิโนกับน้ำตาลรีดิวซิง ซึ่งทำให้สีและกลิ่นของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไปได้ โดยส่วนใหญ่ปฏิกิริยาเช่นนี้เกิดขึ้นกับแป้งจากธัญพืช เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนสูง

3. เถ้า (Ash)

แป้งโดยทั่วไปมีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์ เช่น โซเดียม โปแทสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม สามารถวิเคราะห์หาปริมาณได้จากส่วนที่เหลือหรือเถ้าจากการเผาไหม้โดยสมบูรณ์ ปริมาณเถ้าในแป้งมันฝรั่งจะสัมพันธ์กับหมู่ฟอสฟอรัสในแป้ง สำหรับเถ้าในแป้งจากธัญพืชจะสัมพันธ์กับปริมาณฟอสฟอไลปิด (Swinkels, 1985b)

4. ฟอสฟอรัส (Phosphorus)

ฟอสฟอรัสภายในแป้งพบอยู่ในรูปของฟอสเฟตเชื่อมกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 และ 6 ของหน่วยกลูโคส (Lineback, 1996) และในรูปของฟอสฟอไลปิด (phospholipid) ประมาณร้อยละ 0.02 – 0.06 ส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสน้อยกว่าร้อยละ 0.1 ซึ่งแป้งจากธัญพืชมีฟอสฟอรัสในรูปฟอสฟอไลปิด ส่วนแป้งจากพืชหัวและรากมักพบฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตมีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสอยู่ประมาณร้อยละ 0.3 – 0.4 เช่น แป้งมันฝรั่ง แป้งพุทธรักษา ซึ่งโมเลกุลแป้งมีประจุเป็นลบแรงผลักระหว่างประจุลบจะทำให้แป้งมันฝรั่งมีคุณสมบัติพองตัวง่ายและมีความหนืดสูงกว่าแป้งชนิดอื่น

2.2 สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้ง

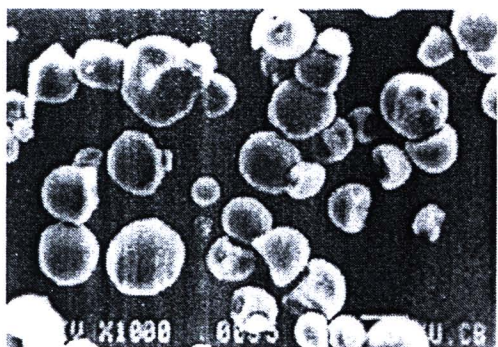
2.2.1 ลักษณะของเม็ดแป้ง

แป้งที่พบทั่วไปในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้ง (granule) ขนาดเล็ก เมื่อตรวจสอบดูลักษณะของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาและกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน พบว่าเม็ดแป้งจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งของแป้งนั้นๆ ลักษณะของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.9 และตารางที่ 2.3

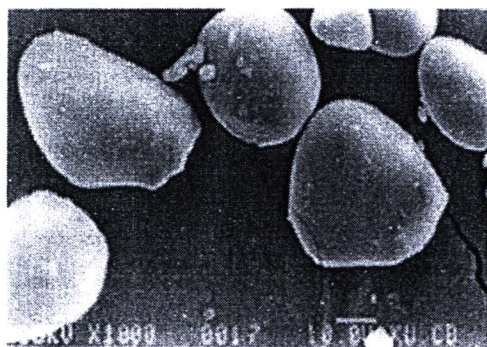
ตารางที่ 2.3 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ

แหล่งแป้ง	ขนาด (ไมครอน)	รูปร่าง
ข้าวสาลี	2 – 35	กลม ก่อนข้างรี
ข้าวโพด	5 – 25	กลมแบน มีหลายเหลี่ยม รูปร่างคล้ายแท่ง
ข้าวเจ้า	3 – 5	แบน มีหลายเหลี่ยม
ข้าวบาร์เลย์	2 – 35	กลม คล้ายไข่
ข้าวฟ่าง	15 – 35	กลมแบน มีหลายเหลี่ยม
ข้าวโอ๊ต	5 – 8	กลมแบน มีหลายเหลี่ยม
ข้าวไรน์	10 – 50	กลม ก่อนข้างรี
ลูกเดือย	8 – 20	กลมแบน มีหลายเหลี่ยม
Triticale	2 – 35	กลม ก่อนข้างรี
มันฝรั่ง	15 – 121	กลม รูปไข่มีวงคล้ายเปลือกหอย
มันสำปะหลัง	5 – 35	กลม คล้ายไข่ที่มีรอยตัด
หัวยาหม้อม	13 – 70	รูปไข่
สาเก	15 - 65	รูปไข่ที่มีรอยตัด

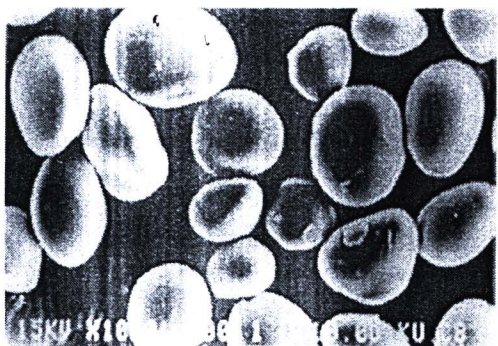
ที่มา: Maningat และ Seib (1992)



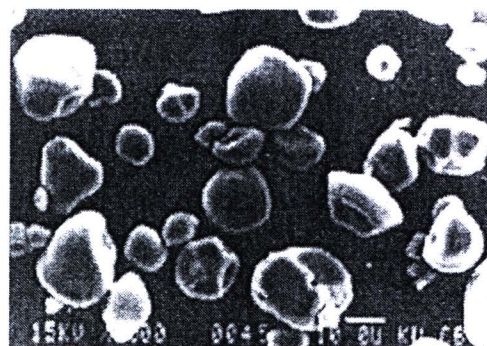
(ง) แป้งมันสำปะหลัง



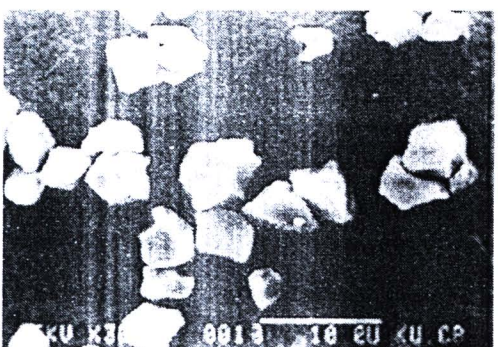
(ข) แป้งสาเก



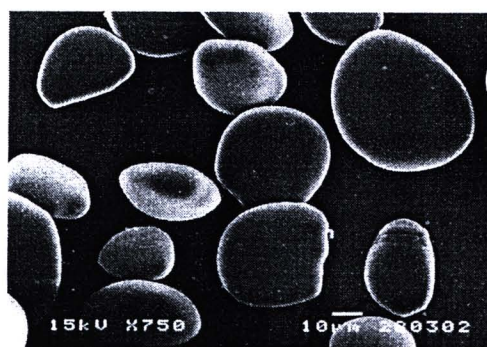
(ค) แป้ง arrowroot



(ง) แป้งมันเทศ



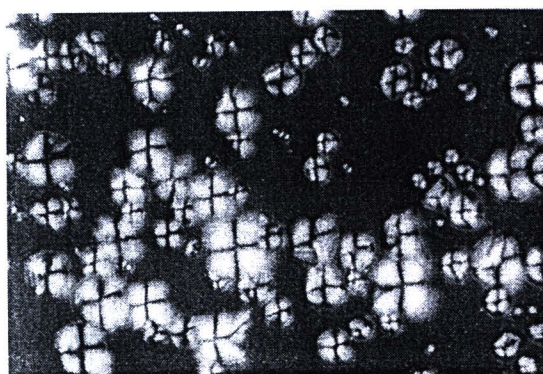
(จ) แป้งข้าวเจ้า



(ฉ) แป้งพุทธรักษา

รูปที่ 2.9 ขนาดและรูปร่างของเมล็ดแป้งชนิดต่างๆ เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน
 ที่กำลังขยาย (ก) – (ง) 1,000 เท่า (จ) 3,000 เท่า และ (ฉ) 750 เท่า
 ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546

สมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของแป้งคือ เม็ดแป้งจะมีโครงสร้างหรือลักษณะที่เรียกว่า ไบรีฟรินเจนซ์ (birefringence) ดังรูปที่ 2.10 และ 2.11 ซึ่งมีความสามารถในการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ได้และเกิดเงากากบาทภายใต้แสงโพลาไรซ์ จุดตัดของกากบาทจะตัดกันที่ตำแหน่ง hilum ของเม็ดแป้ง เม็ดแป้งซึ่งประกอบด้วยอะไมโลสและอะไมโลเพกตินจะเรียงตัวกันในแนวตั้งฉากกับผิวของเม็ดแป้ง เมื่อส่องดูเม็ดแป้งภายใต้แสงโพลาไรซ์พื้นที่มืดภายในเม็ดแป้งจะเป็นตำแหน่งเฉลี่ยของสายพอลิเมอร์เมื่ออยู่ในลักษณะตั้งฉากหรือขนานกับระนาบแสงโพลาไรซ์ แต่เนื่องจากพื้นผิวของเม็ดแป้งเป็นเส้นโค้ง ดังนั้นจะมีสายพอลิเมอร์บางสายที่ไม่อยู่ในลักษณะตั้งฉากหรือขนานกับระนาบแสงโพลาไรซ์ ทำให้สามารถบิดระนาบแสงและเห็นการส่องสว่างของแสงผ่านทาง nicol prism ตัวที่สอง ความเข้มของไบรีฟรินเจนซ์ขึ้นอยู่กับความหนาของเม็ดแป้ง จำนวนและการจัดเรียงตัวของ crystallite



รูปที่ 2.10 ลักษณะการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์หรือไบรีฟรินเจนซ์ของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง
ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546)



รูปที่ 2.11 ลักษณะการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์หรือไบรีฟรินเจนซ์ของเม็ดแป้งถั่วเขียว
ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546)

2.2.2 ลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง

เนื่องจากเม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็น semi-crystalline คือมีทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่เป็นอสัณฐาน เมื่อสายพอลิเมอร์มาเรียงขนานกันจะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายอะไมโลส 2 สาย หรือเกิดการรวมตัวกับน้ำ (hydrate bridge) เกิดเป็นพื้นที่ส่วนที่เรียกว่าผลึกหรือ micelle ส่วนที่เป็นผลึกนี้เกิดจากอะไมโลเพกตินแต่ละโมเลกุลในหลายๆ micelle เชื่อมกันเป็นร่างแหสามมิติด้วยพันธะไฮโดรเจน ความแข็งแรงของร่างแหขึ้นอยู่กับจำนวนโมเลกุลที่มาเชื่อมต่อกันและการจัดเรียงโมเลกุลของเม็ดแป้ง กล่าวได้ว่าผลึกเกิดจากการเรียงตัวของเกลียวอะไมโลเพกตินที่วางขนานกัน ซึ่งในการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของแป้งจะใช้เครื่อง X-ray diffractometer เป็นเครื่องมือวิเคราะห์โดยไม่ทำลายตัวอย่าง เพื่อศึกษาการจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยอาศัยการเลี้ยวเบน การกระเจิงของรังสีเอ็กซ์และความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก

โดยทั่วไปเม็ดแป้งในธรรมชาติ (native starch) จะมีรูปแบบของ X-ray diffraction เป็น 3 ลักษณะ ดังนี้ (Hizukuri, 1986)

1. A-type ส่วนใหญ่แป้งชนิด A-type มักจะมีความยาวสายโซ่กิ่งของอะไมโลเพกตินสั้น (short branch chain length) แป้งจากธัญพืช เช่น ข้าว ข้าวโพด และข้าวสาลี จัดอยู่ในกลุ่มนี้
2. B-type ส่วนใหญ่แป้งชนิด B-type มักจะมีความยาวสายโซ่กิ่งของอะไมโลเพกตินยาว แป้งจากรากและหัว เช่น มันฝรั่ง พุทธรักษา และทิวลิป รวมทั้ง amylomaize (ปริมาณอะไมโลสมากกว่า 40 - 45%) จัดอยู่ในกลุ่มนี้
3. C-type มีลักษณะ X-ray pattern ที่ผสมระหว่าง A-type และ B-type เช่น แป้งจากมันสำปะหลัง แป้งจากถั่วชนิดต่างๆ
4. V-type ได้แก่แป้งที่มีลักษณะเพิ่มจาก A-type และ B-type ได้จากสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีขั้ว (Zobel, 1964)

ในแป้งดิบ เม็ดแป้งจะมีโครงสร้างเป็นแบบ semi-crystalline คือ มีส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) และมีส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินโดยสายพอลิเมอร์ของกลูโคสในส่วนที่เป็นเส้นตรงของอะไมโลเพกตินจะสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจน ทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นผลึกที่มีความแข็งแรง ลักษณะเช่นนี้ของเม็ดแป้งจะทำให้เอนไซม์ย่อยแป้งได้น้อยลง โดยแป้งจากธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ซึ่งเป็นแป้งที่มีลักษณะผลึกภายในเป็นแบบ A-type พบว่ามีรูหรือช่องรอบๆ เม็ดแป้ง ซึ่งทำให้เอนไซม์สามารถแทรกผ่านเข้าไปภายในเม็ดแป้งได้และเกิดการย่อยของ

แป้งจากภายในสู่ภายนอก (Benmoussa และคณะ, 2004; Fannon, Hauber, และ BeMiller, 1992) ในขณะที่แป้งมันฝรั่งและแป้งที่มีลักษณะผลึกภายในเป็นแบบ B-type พบว่าส่วนใหญ่เม็ดแป้งจะถูกย่อยจากผิวด้านนอกเข้าสู่ด้านใน (Gallant และคณะ, 1997) ดังนั้นแป้งที่ได้จากรั้วพืชจึงมักจะถูกย่อยได้ง่ายกว่าแป้งที่สกัดจากหัว (tuber) Jane และคณะ (1997), Srichuwong และคณะ (2005) และ Zhang และคณะ (2006) รายงานว่าแป้งที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A-type จะถูกย่อยได้ง่ายกว่าแป้งชนิด B-type

2.2.3 การเกิดเจลาตินในเซชัน

การเกิดเจลาตินในเซชัน คือ การสูญเสียความเป็นระเบียบของโมเลกุลในเม็ดแป้งจนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติบางประการอย่างไม่ผันกลับ เช่น การพองของเม็ดแป้ง การหลอมเหลวของโครงสร้างผลึก (native crystalline melting) การสูญเสียไบริฟรินเจนซ์และความสามารถในการละลายของแป้ง จุดเริ่มต้นของการเกิดเจลาตินในเซชันและช่วงระยะของการเกิดขึ้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแป้ง วิธีการศึกษาและชนิดของเม็ดแป้ง (Atwell และคณะ, 1988) โมเลกุลแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนและจัดเรียงตัวในลักษณะเป็น micelles การจัดเรียงตัวในลักษณะนี้ทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ขณะที่เม็ดแป้งอยู่ในน้ำเย็นจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย (Leach และคณะ, 1959) เมื่อให้ความร้อนแก่แป้งในสถานะที่มีน้ำ พันธะไฮโดรเจนที่อยู่ภายในเม็ดแป้งถูกทำลายทำให้น้ำสามารถแทรกเข้าไปในเม็ดแป้งได้และเกิดการพองตัวขึ้น (swelling) ทำให้ความหนืดและความใสเพิ่มมากขึ้น จนเมื่อเม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ก็จะทำให้เกิดความหนืดสูงสุด (peak viscosity) แล้วแตกออก ความหนืดจะลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.12 ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาตินในเซชัน (gelatinization) แป้งแต่ละชนิดมีอุณหภูมิจากการเกิดเจลาตินในเซชันแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับพันธะในเม็ดแป้งนั้นๆ (Smith, 1982)

การเกิดเจลาตินในเซชันเป็นผลมาจากการทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้ง กลไกการเกิดเจลาตินในเซชันมี 2 ขั้นตอน (Marchant และ Blanshard, 1978) คือ

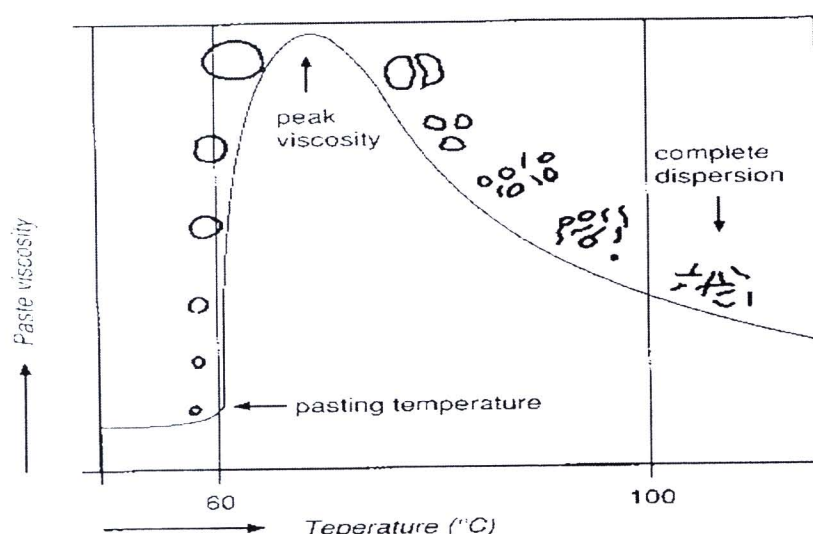
ขั้นตอนที่ 1 การกระจายของน้ำเข้าสู่เม็ดแป้ง

เมื่อนำเม็ดแป้งมาละลายในน้ำเย็น เม็ดแป้งจะดูดน้ำและพองตัวแบบผันกลับได้ และยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบไบริฟรินเจนซ์ได้ Tako และ Hizukuri (2000) เสนอรูปแบบการเกิดพันธะ

ไฮโดรเจนระหว่างอะไมโลสและอะไมโลเพกตินของแป้งข้าวในสารแขวนลอยก่อนการเกิดเจลละติไนเซชันว่า การเกิดพันธะไฮโดรเจนในแป้งจะเกิดขึ้นที่ออกซิเจนที่ตำแหน่งคาร์บอนที่ 6 ของอะไมโลสและหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ของอะไมโลเพกติน

ขั้นตอนที่ 2 การพองตัวและการหลอมเหลว

เมื่อนำสารละลายแป้งที่มีปริมาณน้ำมากพอ (ความชื้นมากกว่าร้อยละ 70) มาให้ความร้อน ผลึกของเม็ดแป้งที่จับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย น้ำจะซึมเข้าไปในช่องว่างของเม็ดแป้งและจับกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้ง ทำให้เม็ดแป้งพองตัว การพองตัวของเม็ดแป้งทำให้จนกระทั่งเม็ดแป้งแตกออก อะไมโลสซึ่งละลายน้ำได้ดีกว่า จะออกจากเม็ดแป้งเข้าไปในสารละลายตามด้วยอะไมโลเพกติน และจับกันแน่น จนเกิดเป็นเจล ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า การเกิดเจลละติไนเซชัน และอุณหภูมิที่เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว เรียกว่า อุณหภูมิการเกิดเจลละติไนเซชัน (Gelatinization temperature) การเกิดเจลละติไนเซชันไม่ได้เกิดที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง แต่จะเกิดเป็นช่วงประมาณ 8 - 12 องศาเซลเซียส (Noel และคณะ, 1993)



รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของเม็ดแป้งขณะเกิดเจลละติไนเซชัน

ที่มา: Sanders (1996)

2.2.4 การเกิดรีโทรเกรเดชัน

การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งเป็นสมบัติหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจอย่างมาก เนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันมีบทบาทสำคัญต่อการเก็บผลิตภัณฑ์ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ Atwell และคณะ (1988) ให้คำจำกัดความของการเกิดรีโทรเกรเดชันว่า การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของแป้งที่เกิดเจลาติไนเซชันแล้วมารวมกันในลักษณะโครงสร้างที่เป็นระเบียบ ซึ่งเป็นผลมาจากการสร้างพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ในระหว่างโมเลกุลหรือภายในโมเลกุลเองเกิดโครงสร้างเป็นเกลียว และภายใต้สภาวะที่เหมาะสมอาจมีผลทำให้เกิดโครงสร้างผลึกได้

กลไกการเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นกระบวนการเกิดผลึกของแป้ง เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาติไนเซชันแล้ว การให้ความร้อนต่อไปจะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่มีการพองตัวเต็มที่และเม็ดแป้งแตกออกในที่สุด (Blanshard, 1976) โมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็กระบายตัวออกมาจากเม็ดแป้งและเมื่อปล่อยให้เย็นตัวลง จะเกิดการจัดเรียงตัวเป็นโครงร่างแหสามมิติขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลสมีลักษณะเป็นสายตรงสามารถหมุนตัวเองไปเรียงขนานกับโมเลกุลของอะไมโลสด้วยกันเองหรือกับส่วนที่เป็นเส้นตรงในโมเลกุลของอะไมโลเพคติน จนเข้าใกล้กันมากพอที่จะเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นระหว่างโมเลกุล การเรียงตัวกันใหม่นี้มีผลทำให้น้ำที่เคยจับกันอยู่ก่อนถูกกำจัดออกไป ผลึกที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นเจลจะมีการแยกน้ำ (syneresis) ซึ่งสังเกตได้จากการที่มีน้ำซึมออกมาจากผิวของผลิตภัณฑ์ (Fan และ Marks, 1998)

Klucinnec และ Thomson (1999) พบว่าในระหว่างการเกิดรีโทรเกรเดชันโมเลกุลของอะไมโลสจะอยู่ในลักษณะที่เป็นเกลียวคู่ (double-helical) เกิดจากการรวมตัวของกลูโคสประมาณ 40-70 หน่วย และโมเลกุลของอะไมโลเพคตินก็จับตัวเป็นเกลียวคู่เช่นกันแต่สั้นกว่าเนื่องจากข้อจำกัดของโครงสร้างที่มีกิ่งก้านสาขา เกลียวคู่ที่เกิดขึ้นจะรวมตัวกันเป็นผลึก

การเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทำให้สมบัติของแป้งเปลี่ยนแปลงไป ผลจากการเกิดรีโทรเกรเดชันที่มีต่อเจลาของแป้งคือ (ณรงค์ นิยมวิทย์และ อัญชนีย์ อุทัยพัฒนาชีพ, 2528)

- ทำให้เจลาของแป้งสลายตัวได้ยาก เมื่อสัมผัสกับกรดและเอนไซม์ เนื่องจากการเรียงตัวระหว่างโมเลกุลด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้โครงสร้างแน่นและแข็งเพิ่มมากขึ้น โมเลกุลของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล

- ทำให้เจลของแป้งข้น เนื่องจากเกิดผลึกขึ้นมากมายและหลายขนาด โดยขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง แป้งที่เกิดผลึกขนาดใหญ่กว่า 250 นาโนเมตร แสงจะผ่านไม่ได้และจะสะท้อนออกมา เจลที่ได้จึงมีลักษณะข้น แต่ถ้าผลึกมีขนาดเล็กกว่า 250 นาโนเมตร แสงผ่านได้ เจลที่ได้จะมีลักษณะใส

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-ด่างของระบบ ปริมาณและขนาดของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน รวมทั้งองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ในแป้ง (Swinkles, 1985) ปริมาณและขนาดของอะไมโลสมีความสำคัญต่อการคืนตัวของแป้ง แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้ดีและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพกตินสูง การเกิดการคืนตัวหรือรีโทรเกรเดชันนี้จะทำให้เกิดการแยกตัวของน้ำจากเจลแป้ง (syneresis) ซึ่งจะสัมพันธ์กับคุณสมบัติ freeze-thaw stability ของแป้ง โดยแป้งที่เกิดการคืนตัวได้ดีจะมีค่า freeze-thaw stability ต่ำ ในขณะที่แป้งที่มีการคืนตัวต่ำจะมีค่า freeze-thaw stability สูง ดังนั้นการวัด freeze-thaw stability จึงสามารถใช้ประเมินการเกิดการคืนตัวของแป้งได้ (กล้านรงค์ ศรีรอดและ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543) และในระหว่างการเก็บเป็นเวลานาน อะไมโลเพกตินจะตกผลึก ดังนั้นเม็ดแป้งที่พองตัวจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นเสริมจากอะไมโลส ผลของการคืนตัวในผลิตภัณฑ์ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ทำให้เกิดการ staling ในผลิตภัณฑ์ขนมปังหรือความแข็ง (hardness) ในผลิตภัณฑ์อื่นที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ (Karim และคณะ, 2000) การป้องกันการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง คือ การเตรียมเป็นอนุพันธ์แป้ง (starch derivatives) ด้วยกลุ่มอีเทอร์หรือเอสเทอร์ เพื่อขัดขวางการเกิดพันธะระหว่างโมเลกุล

2.2.5 วิธีการศึกษาการเกิดการคืนตัวของแป้ง

วิธีการศึกษาการเกิดการคืนตัวของแป้งสามารถแบ่งได้ 2 วิธี ดังนี้

Macroscopic techniques

การตรวจการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพที่เห็นได้ชัดเจนจากการคืนตัวของแป้ง เช่น การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส ดังนั้นเทคนิคการศึกษาความหนืด (Rheological techniques) การทดสอบทางประสาทสัมผัส (Sensory evaluation of texture) การวัดคุณสมบัติทางความร้อนด้วย Differential scanning calorimetry (DSC) และการวัดการเกิดซินเนอริซิส (syneresis) จึงจัดเป็นวิธีการแบบ Macroscopic

Molecular techniques

เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงในการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ของแป้งหรือการเคลื่อนที่ของน้ำในเจลของแป้งในระดับโมเลกุล เทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบ เช่น X-ray diffractometry, Nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR), Vibration spectroscopy (เช่น Raman Spectroscopy) และ Fourier transform infrared (FT-IR) (Karim และคณะ, 2000)

การวัดการเกิดซินเนอริซิสของแป้งเป็นวิธีการที่ทำได้ง่าย สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้แนวโน้มของแป้งในการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ การวัดร้อยละของการเกิดซินเนอริซิสทำได้โดยการวัด Freeze-thaw stability ของแป้งหาได้จากการใช้หลักการ Gravimetric ของน้ำที่แยกออกจากเจลแป้งหรือผลิตภัณฑ์ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ วิธีการทั่วไปคือ นำตัวอย่างไปแช่แข็งและละลายเข้าไปซ้ำมาหลายรอบ เมื่อมีของเหลวแยกออกมา ก็จะนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อนำมาคำนวณเป็นร้อยละ (Karim และคณะ, 2000) การศึกษาความหนืดก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถบอกแนวโน้มการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งได้เช่นกัน โดยพิจารณาจากค่า setback (Karim และคณะ, 2000)

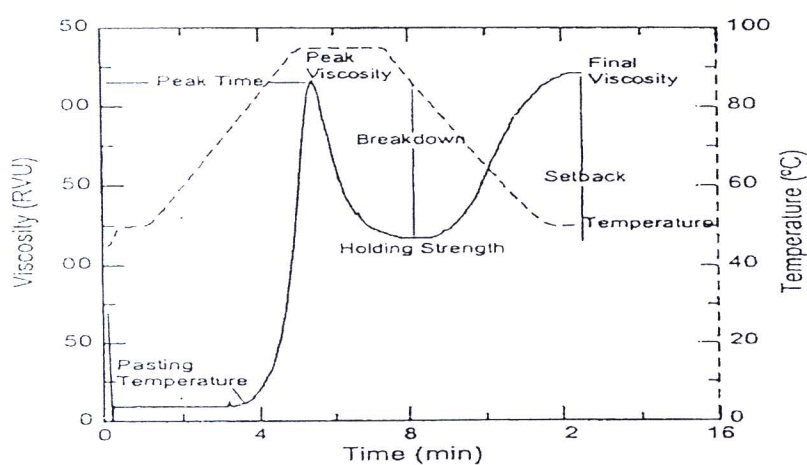
2.2.6 ความหนืด (Viscosity)

การวิเคราะห์ความหนืดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว (Rapid visco analyzer: RVA) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ความหนืดของตัวอย่างได้ในเวลาอันรวดเร็ว การเตรียมตัวอย่างไม่ยุ่งยากและใช้ตัวอย่างไม่มากนัก มีลักษณะของค่าที่วัดได้คล้ายคลึงกับค่าที่วัดจากเครื่องบราเบนเดอร์ อะไมโลกราฟ (Brabender amylograph) แต่มีหน่วยที่แตกต่างกัน โดยหน่วยของเครื่อง RVA เรียกว่า หน่วย อาร์.วี.ยู (Rapid visco unit; RVU) การทำงานของเครื่องควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ใช้เวลาวิเคราะห์ทั้งสิ้นประมาณ 13 นาที โดยอ่านค่าความข้นหนืดสูงสุดได้ภายใน 3-5 นาที

หลักการทำงานของเครื่อง RVA คือ เมื่อนำตัวอย่างแป้งผสมน้ำใส่ลงไปในภาชนะของเครื่องแล้วให้ความร้อนโดยมีการกวนที่ความเร็ว 160 รอบต่อนาที เครื่องจะบันทึกผลในลักษณะกราฟของความหนืดที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาระหว่างการให้ความร้อนและการทำให้เย็นลง ดังแสดงในรูปที่ 2.13

ค่าที่อ่านได้เพื่อแสดงคุณสมบัติของการเปลี่ยนแปลงความข้นหนืดของตัวอย่างที่วิเคราะห์ มีดังนี้

- 1) อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส
- 2) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) มีหน่วยเป็น RVU
- 3) เวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด (peak time) มีหน่วยเป็น นาที
- 4) อุณหภูมิที่ความหนืดขั้นสูงสุด (peak temperature) มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส
- 5) ความคงตัวต่อการกวน (holding strength) เป็นค่าความหนืดขั้นต่ำสุด หลังจากการเกิดความหนืดขั้นสูงสุดซึ่งเกิดขึ้นขณะลดอุณหภูมิให้เย็นลง มีหน่วยเป็น RVU
- 6) เบรกดาวน์ (breakdown) เป็นค่าผลต่างระหว่างความหนืดขั้นสูงสุด กับ ค่าความคงตัวต่อการกวน มีหน่วยเป็น RVU
- 7) ความหนืดขั้นสุดท้าย (final viscosity) มีหน่วยเป็น RVU
- 8) เซตแบคจากความหนืดขั้นสูงสุด (setback from peak) เป็นค่าผลต่างระหว่างความหนืดขั้นสุดท้ายลบด้วยความหนืดขั้นสูงสุด มีหน่วยเป็น RVU
- 9) เซตแบคจากความคงตัวต่อการกวน (setback from trough) เป็นค่าผลต่างระหว่างความหนืดขั้นสุดท้ายลบด้วยความหนืดขั้นที่คงทนต่อการกวน มีหน่วยเป็น RVU



รูปที่ 2.13 กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดด้วยเครื่อง RVA

ที่มา: Newport Scientific Pty, Ltd., (1995)

2.3 การดัดแปรแป้ง

อุตสาหกรรมอาหารตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.1073-2535) ได้ให้ความหมายของแป้งดัดแปร (modified starch) ไว้ คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้ง เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งสาลี มาเปลี่ยนสมบัติทางเคมีและ/หรือทางฟิสิกส์จากเดิมด้วยความร้อนและ/หรือเอนไซม์และ/หรือสารเคมีชนิดต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่างๆ โดยการใช้แป้งดัดแปรในอุตสาหกรรมอาหารนั้นเกณฑ์ที่กำหนดและลักษณะซึ่งบ่งของแป้งดัดแปรแต่ละชนิดจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของกระทรวงอุตสาหกรรม (2535)

แป้งดิบโดยทั่วไปอาจมีสมบัติบางประการไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรม ได้แก่ มีช่วงความหนืดที่แคบ มีลักษณะเนื้อสัมผัสไม่ดี มีความสามารถทนต่อแรงเฉือนในกระบวนการผลิตหรือทนต่อสภาวะต่างๆ ได้ต่ำ ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำและสิ้นเปลืองงบประมาณในการผลิตโดยไม่จำเป็น ดังนั้นจึงมีการดัดแปรคุณสมบัติบางประการของแป้งดิบเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน เช่น ทำให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น สามารถทนต่อสภาวะในการผลิตได้ดีขึ้น (Light, 1990) การเกิดเจลลาติไนซ์ การคืนตัว และการสูญเสียน้ำของเจลลดลง มีความคงตัวในการคืนรูปจากการแช่แข็ง (freeze-thaw) เพิ่มขึ้น ลักษณะของเนื้อเจลดีขึ้น หรือความสามารถในการผสมกับตัวทำละลายอื่นๆ เพิ่มขึ้น (BeMiller, 1997)

2.3.1 การดัดแปรทางเคมี (Chemical modification)

การดัดแปรทางเคมีสามารถทำได้หลายวิธี เช่น

1. การทำให้เกิดอนุพันธ์ (derivatization)

- การแทนที่สารในโมเลกุลเดี่ยวของแป้ง (monostarch substitution) ทั้งปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ($R = -COCH_3$) เช่น แป้งแอซีเตต หรือปฏิกิริยาอีเทอร์ฟิเคชัน ($R = -CH_3$) เช่น แป้งไซโตรอกซีเอทิล

- การแทนที่โดยโมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ เช่น แป้งครอสลิงค์

2. การลดขนาดของโมเลกุลแป้งโดยใช้กรด (acid thinning) เช่น การย่อยแป้งด้วยกรดซัลฟูริก

3. ออกซิเดชัน (oxidation) ทำให้เกิดการฟอกสีและลดขนาดของโมเลกุลโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน

4. การย่อยสลาย (hydrolysis) โดยใช้น้ำย่อยหรือกรด เพื่อย่อยสลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็ก

แป้งดัดแปรที่ได้จากการทำให้เกิดอนุพันธ์เรียกว่า อนุพันธ์ของแป้ง (starch derivatives) ทั้งแป้งอีเทอร์ (starch ether) และแป้งเอสเทอร์ (starch ester) จัดเป็นแป้งสเตบิไลซ์ ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเม็ดแป้งกับสารทำปฏิกิริยา (etherifying agent หรือ esterifying agent) ในสถานะเบส โดยทั่วไปแป้งอีเทอร์และแป้งเอสเทอร์ที่ใช้ทางการค้ามีระดับการแทนที่ต่ำกว่า 0.2 หมู่ฟังก์ชันต่างๆ จะเข้าแทนที่ภายในโมเลกุลของกลูโคสที่หมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 โดยส่วนใหญ่แป้งแอซีเทต ไฮดรอกซีอัลคิลสตาร์ช คาร์บอกซีเมทิลสตาร์ช และแกทไอออนิกสตาร์ช จะมีหมู่แทนที่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ส่วนหมู่แทนที่อื่นๆ จะเข้าแทนที่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 สำหรับคาร์บอนตำแหน่งที่ 3 จะมีหมู่ฟังก์ชันเข้าแทนที่น้อยมาก

การเข้าแทนที่ด้วยหมู่ฟังก์ชันอีเทอร์หรือเอสเทอร์ ส่วนใหญ่มีผลทำให้เกิดการยับยั้งการคืนตัวของแป้งและทำให้แป้งมีความเหนียวคงตัว แสดงลักษณะเป็นแป้งสเตบิไลซ์ (stabilized starch)

2.3.1.1 ปฏิกิริยาอีเทอร์ฟิเคชัน (Etherification)

ปฏิกิริยาอีเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารเคมีที่มีหมู่อีเทอร์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแป้งอีเทอร์ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. ไฮดรอกซีอัลคิลสตาร์ช (hydroxyalkyl starch) หรือแป้งไม่มีประจุ เช่น

- ไฮดรอกซีโพรพิลสตาร์ช (hydroxypropyl starch)
- ไฮดรอกซีเอทิลสตาร์ช (hydroxyethyl starch)
- ไฮยาโนเอทิลสตาร์ช (cyanoethyl starch)

2. คาร์บอกซีเมทิลสตาร์ช (carboxymethyl starch) หรือแป้งที่มีประจุลบ

3. แกทไอออนิกสตาร์ช (cationic starch) หรือแป้งที่มีประจุบวก เช่น

- เทอร์ติเออร์อะมิโนอัลคิลสตาร์ชอีเทอร์ (tertiary aminoalkyl starch ether)
- ควอเทอร์นารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ (quaternary ammonium starch ether)

หมู่ฟังก์ชันที่สามารถเข้าแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลในหน่วยกลูโคสเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์แป้งอีเทอร์มีดังนี้

- เมทิล (methyl)
- ไฮดรอกซีเอทิล (hydroxyethyl)
- ไฮดรอกซีโพรพิล (hydroxypropyl)
- ไฮยาโนเอทิล (cyanoethyl)

- ไฮดรอกซีโพรพิล ไตรเมทิล แอมโมเนียมคลอไรด์ (hydroxypropyl-tri-methyl ammonium chloride)
- เบนซิล (benzyl)
- คาร์บอกซีเมทิล (carboxymethyl)

คุณสมบัติโดยทั่วไปของแป้งอิเทอร์

แป้งเกิดการคั่นตัวลดลง โดยหมู่แทนที่ที่ต่างชนิดกันจะมีประสิทธิภาพในการลดการคั่นตัวของแป้งต่างกัน หมู่แทนที่สายยาว (long side-chain) จะมีประสิทธิภาพมากกว่าหมู่แทนที่ที่มีสายสั้น หมู่แทนที่ที่มีประจุจะมีประสิทธิภาพมากกว่าหมู่แทนที่ที่ไม่มีประจุ อุณหภูมิการเกิดเจลต่ำลง ทำให้แป้งพองตัวได้ในน้ำเย็น แป้งเปียกมีความเหนียวสูงขึ้น คงตัวมากขึ้นและยึดติดได้ดี फिल्मมีความใสมากขึ้น ทนต่อกรด เบส และสารออกซิไดซ์ (oxidizing agent) อย่างอ่อนได้ นอกจากนี้แป้งเปียกและฟิล์มสามารถต้านทานการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ได้ (sander, 1996) คุณสมบัติโดยทั่วไปอาจกล่าวได้ว่ามีลักษณะเป็นสารเพิ่มความคงตัว มีความหนืดสูงกว่าแป้งปกติ

แป้งอิเทอร์ที่อนุญาตให้ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร คือ แป้งไฮดรอกซีโพรพิลซึ่งจัดเป็นแป้งประเภทที่ไม่มีประจุได้มาจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับโพรพิลีนออกไซด์ การแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซีโพรพิลในเม็ดแป้งทำให้ความแข็งแรงของพันธะในเม็ดแป้งลดลง เป็นเหตุให้อุณหภูมิเริ่มเกิดความร้อน (pasting temperature) ของแป้งลดลง เมื่อระดับการแทนที่สูงขึ้นอุณหภูมิเริ่มเกิดความร้อนก็จะมีค่าลดลงและความคงตัวต่อการแช่แข็งและละลายหรือการเก็บที่อุณหภูมิต่ำจะดียิ่งขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติการชอบน้ำของหมู่ไฮดรอกซีโพรพิลจะรักษาน้ำให้อยู่ในเจลของแป้งสูงจึงไม่เกิดซินเนอริซิสเมื่อผ่านการแช่แข็งและละลายหลายๆครั้ง

2.3.1.2 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification)

แป้งเอสเทอร์เป็นแป้งดัดแปรที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (ปฏิกิริยาของกลุ่มแอลกอฮอล์กับกรด) ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งกับหมู่ให้เอสเทอร์ของสารเคมี แป้งเอสเทอร์ที่นิยมใช้ทางการค้าได้แก่ แป้งแอซิเตต (starch acetate) และแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ (starch phosphate monoester) (Rutenberg และ Solarek, 1984) แป้งดัดแปรทั้งสองชนิดมีความหนืดสูงกว่าแป้งดิบ และรักษาความหนืดไว้ได้ดี เมื่อเกิดเป็นเจลจะมีความใส มีความอ่อนตัวและยึดเกาะเป็นเนื้อเดียวกัน มีความคงตัวต่อสภาวะ

การแช่แข็งและละลาย เหมาะสำหรับการใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็ง นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติในการเป็นสารช่วยแตกตัวที่ดีและมีราคาถูก จึงมีการนำแป้งเอสเทอร์มาใช้เป็นสารช่วยแตกตัวในการผลิตยาเม็ด (Mitrevej, 1996)

หมู่ฟังก์ชันที่สามารถเข้าแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลในหน่วยกลูโคสเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์แป้งเอสเทอร์มีดังนี้: acetate, benzoate, phosphate, succinate, maleinate ในการผลิตแป้งเอสเทอร์สามารถแบ่งตามระดับการเกิดปฏิกิริยาได้เป็น 3 ชนิด (Tessler และ Billmers, 1996) คือ

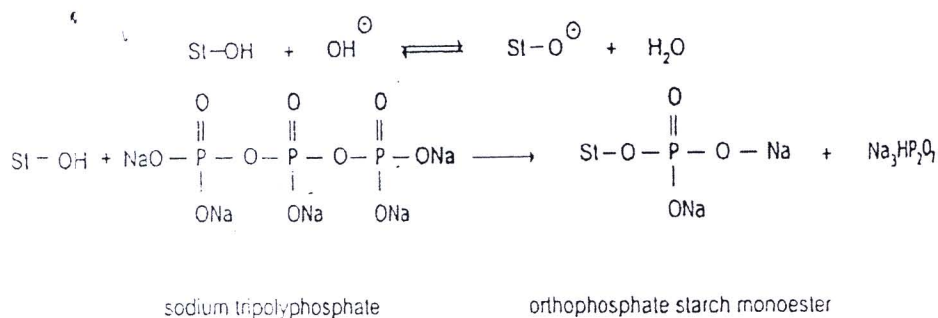
- การทำปฏิกิริยาโดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง ให้ระดับการแทนที่ต่ำกว่า 0.2
- การทำปฏิกิริยาโดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง ให้ระดับการแทนที่ปานกลาง (0.2-0.5) โดยคัดแปรแป้งหลายๆ ครั้งจะได้ระดับการแทนที่เพิ่มขึ้น
- การทำปฏิกิริยาโดยไม่ใช้น้ำเป็นตัวกลาง ให้ระดับการแทนที่สูงประมาณ 3 ใช้ไพรดีนเป็นตัวทำละลาย

แป้งแอซีเทต

แป้งแอซีเทตเป็นแป้งเอสเทอร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการความคงตัวของสารละลาย (solution stability) และสมบัติทางหน้าที่ (functional properties) เช่น ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เนื่องจากแป้งมีแนวโน้มที่จะมีความหนืดเพิ่มขึ้นในขณะลดอุณหภูมิและขณะเก็บ และในช่วงสุดท้ายของการเจลดจะเกี่ยวข้องกับการรวมกันของโมเลกุลอะไมโลส มีหลายวิธีที่จะลดหรือกำจัดปรากฏการณ์การตกผลึกหรือการคืนตัวซึ่งส่งผลต่อความคงตัวของสารละลายแป้ง การเติมหมู่แอซีทิล (acetylation) เป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยป้องกันหรือลดการรวมตัวของสายกิ่งด้านนอกของโมเลกุลอะไมโลเพคตินด้วย ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อผลิตภัณฑ์อาหารโดยป้องกันความชื้นและการบีบตัวเอาน้ำออกมาของแป้งข้าวเหนียวเมื่อเก็บที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากระดับการแทนที่ที่ค่อนข้างต่ำเพียงพอที่จะทำให้สารละลายมีความคงตัว แป้งแอซีเทตจะมีลักษณะเป็นเม็ดและมีระดับการแทนที่น้อยกว่า 0.2 (5% acetyl) แป้งคัดแปรชนิดนี้นิยมใช้ในอาหารเป็นสารให้ความข้น (thickening agent) (Rutenburg และ Solarek, 1984) และยังสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นได้ เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมกระดาษ เป็นต้น

แป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์

แป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์เป็นแป้งดัดแปรที่มีประจุลบ เกิดจากปฏิกิริยาฟอสฟอรีเลชัน (phosphorylation) ระหว่างแป้งกับสารโซเดียมไตรพอลิฟอสเฟต ดังรูปที่ 2.14 หมู่ฟอสเฟตในแป้งได้มาจากกรดฟอสฟอริกหรือเกลือละลายน้ำของออร์โท-ไพโร-เมตาหรือไตรพอลิฟอสเฟต โดยส่วนใหญ่หมู่ฟอสเฟตจะเข้าแทนที่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 (Solarek, 1986) แป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ให้ความหนืด ความใส และความคงทนต่อการคั่วหรือการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งได้ดี



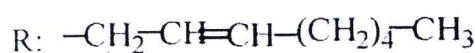
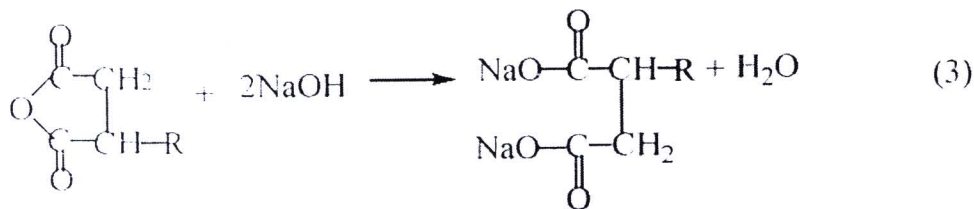
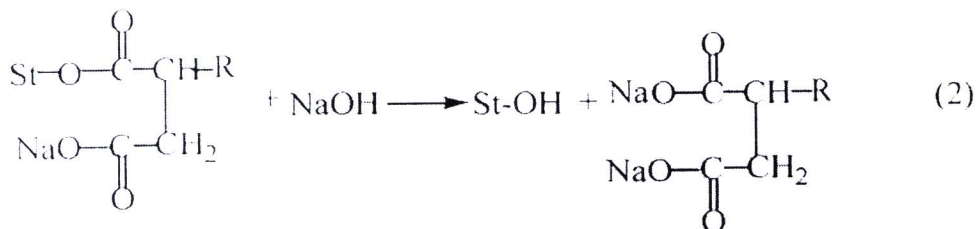
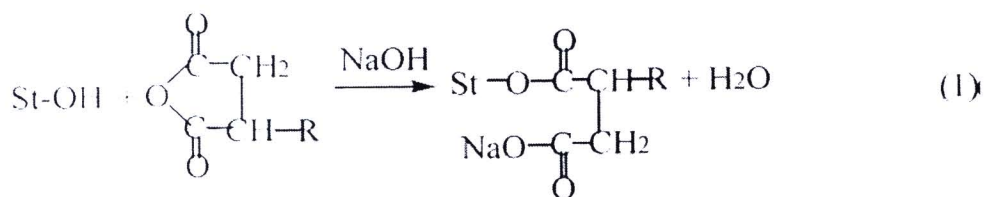
รูปที่ 2.14 ปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารโซเดียมไตรพอลิฟอสเฟตได้แป้งออร์โทฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์
ที่มา: Solarek (1986)

แป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ที่อนุญาตให้ใช้ในอาหารเตรียมได้จากการนำแป้งมาทำปฏิกิริยากับกรดออร์โทฟอสฟอริกหรือโซเดียมหรือโพแทสเซียมออร์โทฟอสเฟตหรือโซเดียมไตรพอลิฟอสเฟต โดยมีเกณฑ์ที่กำหนดคือ ต้องมีปริมาณฟอสเฟต (เมื่อคำนวณเป็นปริมาณฟอสฟอรัส) ไม่เกิน 0.4 และมีลักษณะขี้ผึ้งเช่นเดียวกับแป้งแอซีเตด (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2535)

แป้งเอสเทอร์จะเกิดการสลายตัวได้ง่ายโดยจะเกิดไฮโดรไลซิสด้วยเบสค่อนข้างเร็ว เช่น แป้งแอซีเตดที่มีหมู่แอซิติล 1.8% จะเกิดดีแอซิติลเลชันอย่างสมบูรณ์ในเวลา 4 ชั่วโมง ที่สภาวะที่มี pH 11 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงไม่ควรนำแป้งแอซีเตดไปใช้ในสภาวะที่เป็นเบสเพราะเมื่อเกิดดีแอซิติลเลชันแล้ว แป้งจะกลับไปมีคุณสมบัติเหมือนแป้งปกติที่ยังไม่ผ่านการดัดแปร (Rutenberg และ Solarek, 1984)

แป้งออกทิลซัคซินิกแอนไฮไดรด์

แป้งออกทิลซัคซินิกแอนไฮไดรด์ที่ใช้ในอาหารเป็นแป้งดัดแปรที่มีระดับการแทนที่ต่ำ มีวิธีการเตรียมพื้นฐานคือ เริ่มต้นจะเตรียมแป้งในน้ำที่ความเข้มข้นในช่วง 25-40% ปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 8-9 ด้วย NaOH ที่ความเข้มข้น 2-3% โดยมีการกวนตลอดเวลา จากนั้นค่อยๆเติม OSA ที่ความเข้มข้น 1-3% (w/w แป้ง) และมีการควบคุม pH ให้คงที่ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 2-8 ชั่วโมง เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาปรับ pH ให้เป็นกลาง นำไปล้างด้วยน้ำและทำให้แห้ง แป้งดัดแปรที่ได้จะยังคงอยู่ในสภาพที่เป็นเม็ดแป้ง ดังสมการ (1) ในรูปที่ 2.15 NaOH จะทำหน้าที่ในการเพิ่ม nucleophilicity ของหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลแป้ง (OH เปลี่ยนเป็น O⁻) และช่วยเพิ่มการพองตัวของเม็ดแป้งซึ่งจะทำให้ OSA เข้าถึงโมเลกุลแป้งได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตาม NaOH ก็อาจก่อให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงดังสมการ (2) และ (3) ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาลดลงได้



รูปที่ 2.15 การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างแป้งกับ OSA

ที่มา: Song และคณะ (2006)

คุณสมบัติทางด้านความร้อนและด้านความหนืด

โดยทั่วไปพบว่า การดัดแปรแป้งด้วย OSA ทำให้แป้งที่ได้มีความหนืดสูงขึ้น Bao และคณะ (2003) รายงานว่า แป้งข้าว แป้งมันสำปะหลัง แป้งสาลี แป้งมันฝรั่ง และแป้งข้าวโพดหลังการดัดแปร มีความหนืดสูงกว่าแป้งดิบ โดยระดับการเปลี่ยนแปลงความหนืดขึ้นกับแหล่งของพืชและปริมาณ OSA ที่ใช้ การเพิ่มปริมาณ OSA จะทำให้ความหนืดของแป้งเพิ่มขึ้น จากการศึกษาการดัดแปรแป้งด้วย OSA ของ Thirathumthavorn และ Charoenrein (2006) พบว่า แป้งข้าวและแป้งมันสำปะหลังมีความหนืดสูงสุดเพิ่มขึ้น 3 และ 4 เท่า ตามลำดับ อย่างไรก็ตามพบว่า setback ของแป้งดัดแปรมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกับรายงานของ Baß และคณะ (2003) และ Song และคณะ (2006) Han และ BeMiller (2007) รายงานว่า แป้งข้าวโพด แป้งข้าวโพดข้าวเหนียว แป้งมันฝรั่ง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร มีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดลดลง ความหนืดสูงสุดเพิ่มขึ้น โดยค่า setback ของแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมีค่า setback ลดลง

Bao และคณะ (2003) พบว่าการดัดแปรแป้งด้วย OSA ส่งผลให้อุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนซ์ของแป้งข้าวลดลงอย่างชัดเจน ส่วนแป้งสาลิลดลงเล็กน้อย ในขณะที่แป้งมันฝรั่งมีอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนซ์สูงกว่าแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร อย่างไรก็ตามเอนทาลปีของแป้งดัดแปรทั้งสามชนิดมีค่าต่ำกว่าแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร สำหรับแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy maize) และแป้ง Amaranth มีอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนซ์และค่าเอนทาลปีในการเกิดเจลลาติไนซ์ลดลง (Bhosale และ Singhal, 2007; Han และ BeMiller, 2007) Thirathumthavorn และ Charoenrein (2006) พบว่าการดัดแปรแป้งข้าวและแป้งมันสำปะหลังด้วย OSA ทำให้อุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนซ์ของแป้งลดลงเช่นกันและช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนซ์กว้างขึ้น โดย enthalpy ของแป้งข้าวมีค่าลดลง ส่วนของแป้งมันสำปะหลังมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง

คุณสมบัติทางโภชนาการ

การดัดแปรแป้งด้วย OSA พบว่าทำให้แป้งถูกย่อยโดยเอนไซม์ได้ยากขึ้น เนื่องจากหมู่แทนที่ (ออกทิลซัลฟิเนต) มีขนาดใหญ่จึงขัดขวางการเข้าถึงของเอนไซม์ทำให้เอนไซม์จับกับโมเลกุลแป้งยากขึ้น ดังนั้นแป้งดัดแปรด้วย OSA จึงมีปริมาณแป้งย่อยช้า (slowly digestible starch; SDS) และแป้งทนการย่อย (resistant starch; RS) สูงขึ้น การดัดแปรแป้งด้วย OSA พบว่าทำให้ได้แป้งที่มี RS และ SDS สูงกว่าการดัดแปรแป้งโดยการแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซีโพรพิลและหมู่แอซีทิล (Han และ BeMiller, 2007) การดัดแปรแป้งข้าวโพดอะไมโลเพคตินสูงโดยการแทนที่ด้วย OSA ทำให้สัดส่วนของ RDS: SDS: RS

ในแป้ง (ผ่านการให้ความร้อนในน้ำเดือดนาน 20 นาที) เปลี่ยนจาก 84.6:15.3: 0.1 เป็น 51.3 : 28.1: 20.6 (He และคณะ, 2008) นอกจากนี้มีรายงานว่าคาร์โบไฮเดรตแป้งที่ดัดแปรด้วย OSA จะช่วยลดการเพิ่มขึ้นของค่า glycemic index ในเลือดเมื่อเทียบกับน้ำตาลกลูโคส (Wolf และคณะ, 2002) ดังนั้นจึงอาจใช้แป้ง OSA เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารสำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวาน ใช้ในอาหารสำหรับนักกีฬา รวมทั้งผู้ที่ต้องการบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพ

คุณสมบัติในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์

พอลิแซ็กคาไรด์ที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic polysaccharides; HP) เป็นสารโมเลกุลใหญ่ที่สามารถใช้เพื่อช่วยในการกระจายตัวของสารในสภาพสารละลาย (dispersion) การที่ HP มีทั้งส่วนที่ชอบและไม่ชอบน้ำในโมเลกุล (amphiphilic) จึงมีคุณสมบัติ surface active ทำให้ถูกดูดซับที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างเฟสของสารได้ดี จึงช่วยเพิ่มความคงตัวของสารละลาย กลไกในการเพิ่มความคงตัวในการกระจายของสารอาจเกี่ยวข้องกับแรงกระทำทางไฟฟ้า (electrostatic nature) หรือเกี่ยวข้องกับลักษณะความเกะกะของโครงสร้างพอลิแซ็กคาไรด์ (steric nature) ในกรณีของแรงกระทำทางไฟฟ้า ความสามารถในการเพิ่มความคงตัวจะขึ้นกับความหนาแน่นของประจุใน โมเลกุลพอลิแซ็กคาไรด์ ส่วนกรณีที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้าง การเพิ่มความคงตัวจะขึ้นกับขนาดและความสามารถในการละลายของพอลิแซ็กคาไรด์ในเฟสต่อเนื่อง พอลิแซ็กคาไรด์ที่ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารมีเพียงไม่กี่ชนิดที่มีคุณสมบัติ surface active ตัวอย่างเช่น กัมอะราบิก (gum arabic) และ demethoxylated pectin โดยคุณสมบัติทางด้าน surface activity จะเป็นผลเนื่องมาจากโปรตีนที่จับอยู่กับ โมเลกุล

แป้ง OSA มีคุณสมบัติเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์เนื่องจากในโมเลกุลมีทั้งส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic part) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic part) ดังนั้นจึงถูกดูดซับที่บริเวณรอยต่อระหว่างน้ำกับน้ำมัน รวมถึงหยดนํ้ามันได้ดี ช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการรวมตัวกันของอิมัลชัน (Nilsson และ Bergenstahl, 2007) ส่วนที่ชอบน้ำของแป้ง OSA มาจากหมู่ไฮดรอกซิลที่ไม่ถูกแทนที่และหมู่คาร์บอกซิลอิสระในออกทิลซัคซินิลที่ไม่เกิดพันธะเอสเทอร์กับแป้ง ส่วนที่ชอบน้ำมาจากสายไฮโดรคาร์บอนในออกทิลซัคซินิล (8 คาร์บอน) ส่วนที่ชอบน้ำของแป้ง OSA จะหันเข้าหาน้ำ และส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะหันเข้าหาน้ำมัน ทำให้เกิดการแยกเฟสน้ำและน้ำมันได้อย่างสมบูรณ์ (Murphy, 2000)

Viswanathan (1999) เตรียมแป้ง OSA (แป้งข้าวโพดข้าวเหนียว) ในตัวกลางที่เป็นน้ำ (aqueous medium) และตัวกลางที่เป็นสารอินทรีย์ (organic medium) และทดสอบความสามารถในการเป็น

สารอิมัลซิไฟเออร์ (emulsification activity) ของแป้งที่ระดับการแทนที่ (DS) และความเข้มข้นต่างๆ พบว่าความสามารถในการเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่า DS ของแป้ง OSA เสมอไป โดยความสามารถในการเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ของแป้ง OSA ที่เตรียมในตัวอย่างที่เป็นน้ำมันลดลงเมื่อ DS มีค่าสูงขึ้น การเพิ่มความเข้มข้นของแป้ง OSA ที่เตรียมในตัวอย่างที่เป็นน้ำจาก 0.01% เป็น 0.5% ไม่ทำให้ความสามารถในการเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์เพิ่มขึ้น เนื่องจากแป้งยังอยู่ในสภาพที่เป็นเม็ด แต่ในกรณีของแป้ง OSA ที่เตรียมในตัวอย่างที่เป็นสารอินทรีย์พบว่าความสามารถในการเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์จะสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแป้ง OSA มากขึ้นเนื่องจากเม็ดแป้งแตกออกระหว่างการคัดแปร Ntawukulilyayo และคณะ (1996) ศึกษาความสามารถของแป้ง OSA ในการเพิ่มความคงตัวของสารละลายอาหารเซททามอล พบว่าที่ความเข้มข้นแป้ง OSA 0.1% (w/v) สามารถยับยั้งการโคของผลึกยาได้นานมากกว่า 1 ปี Tesch และคณะ (2002) รายงานว่าแป้ง OSA ทำให้อิมัลชันของน้ำมัน (ที่ความเข้มข้น 33%) มีความคงตัวโดยมีขนาดอิมัลชันประมาณ 2 ไมครอน ปริมาณแป้ง OSA ที่ดูดซับบนผิวของอิมัลชัน บางกรณีอาจสูงได้ถึง 16 mg/m^2 ขึ้นกับขนาดของอิมัลชันและปริมาณแป้ง OSA ในระบบ (Nilsson และ Bergenstahl, 2007)

การประยุกต์ใช้แป้ง OSA ในอุตสาหกรรม

ปัจจุบันมีการนำเอาแป้ง OSA มาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่ม และยา เป็นต้น โดยส่วนใหญ่ใช้เพื่อเพิ่มความคงตัวของอิมัลชันทั้งชนิดน้ำในน้ำมันและชนิดน้ำมันในน้ำ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้แป้งออกทินิลซัคซินเนต เช่น สารให้กลิ่นรส (flavour) สารที่ใช้เพื่อปรับความขุ่น (clouding agent) น้ำสลัด กริม น้ำหอม สีนํ้ามัน กาว ฯลฯ (Trubiano, 1986) ตัวอย่างการนำแป้ง OSA ไปใช้ในผลิตภัณฑ์มีดังนี้

เครื่องดื่มที่อยู่ในรูปของอิมัลชัน

ในการเตรียมเครื่องดื่มที่ไม่ใช่แอลกอฮอล์ (soft drink) เช่น ในน้ำอัดลม น้ำผลไม้/น้ำผลไม้เข้มข้น มักจะต้องมีการเติมสารให้กลิ่นรสเพื่อแต่งกลิ่นของเครื่องดื่มให้ดีขึ้น สารให้กลิ่นรสส่วนใหญ่มีความเป็นไฮโดรโฟบิกสูง ถ้านำไปผสมกับน้ำโดยตรงจะเกิดการแยกตัว จึงต้องมีขั้นตอนการทำให้สารเหล่านี้อยู่ในสภาพเป็นอิมัลชันก่อน โดยการเติมสารอิมัลซิไฟเออร์ จากนั้นจึงเติมสารละลายอิมัลชันลงในน้ำที่มีส่วนผสมของน้ำตาลและส่วนประกอบอื่นๆ แป้ง OSA ก็เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ตัวหนึ่งที่นิยมใช้เนื่องจากสามารถละลายได้ดีในน้ำเย็น ไม่ตกตะกอนโดยในเครื่องดื่มใช้ในปริมาณที่ต่ำมาก คือ ประมาณ 100-200

ppm โดยใช้แทนกัมอะราบิก (gum arabic) เนื่องจากอิมัลชันที่ได้มีความคงตัวมากกว่า นอกจากนี้ก็อาจใช้เป็น clouding agent คือช่วยให้เกิดความขุ่นคล้ายกับว่ามีเนื้อผลไม้มากขึ้นและให้ความคงตัวที่ดีด้วย

น้ำสลัด

แป้ง OSA มีความหนืดสูงจึงให้คุณสมบัติด้านความคงตัวที่ดีในระบบที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบ เช่น ในน้ำสลัด ซึ่งมีปริมาณน้ำมันประมาณ 35% โดยทั่วไปแป้งและกัม (gum) กับอิมัลซิไฟเออร์ชนิดอื่นๆ จะใช้เป็นสารให้ความข้นหนืด (thickeners) แต่การใช้แป้ง OSA ไม่เพียงแต่จะให้ความหนืดในระบบ แต่ยังช่วยให้ไขมันกระจายตัวได้ดีขึ้นในขั้นตอนการโฮโมจิไนซ์เพื่อทำให้น้ำสลัดมีเนื้อครีมที่เรียบเนียน มีความเป็นอิมัลชันที่คงตัว และมีความหนืดคงตัวในขณะที่เก็บที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้แป้ง OSA ยังใช้เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ที่ให้ความคงตัวกับอิมัลชันในผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น วิตามิน ยาฆ่าแมลง resin emulsion เป็นต้น

เอนแคปซูลชัน (encapsulation) สารให้กลิ่นรส

เอนแคปซูลชันเป็นกระบวนการที่สารหรือส่วนผสมของสารถูกเคลือบด้วยสารชนิดอื่น สารที่ถูกเคลือบ (coated) หรือถูกขังจับไว้ (entrapped) ส่วนใหญ่จะเป็นของเหลวแต่บางครั้งอาจเป็นอนุภาคของแข็งหรือก๊าซซึ่งจะเรียกชื่อแตกต่างกันไปเช่น core material หรือ internal phase สารที่นำมาเคลือบจะเรียกว่า wall material, carrier, membrane, shell หรือ coating การเอนแคปซูลสามารถนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ เช่น สารให้กลิ่นรส วิตามิน น้ำหอม และน้ำมันที่ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ซึ่งการเอนแคปซูลสามารถปกป้องสารที่อาจทำปฏิกิริยากับส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหาร ลดการเกิดกลิ่นแปลกปลอมที่เกิดจากสารทำปฏิกิริยากัน ปกป้องสารจากแสงและ/หรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน ยืดอายุการเก็บรักษาสารหรือควบคุมการปลดปล่อยสารในผลิตภัณฑ์อาหาร คุณสมบัติของวัสดุห่อหุ้มที่สำคัญคือต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสาร มีความหนืดต่ำที่ความเข้มข้นสูงและให้ประสิทธิภาพในการปกป้องสูง

แป้ง OSA ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุห่อหุ้มในการเอนแคปซูลสารในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากแป้งชนิดนี้มีอนุภาคขนาดเล็ก มีความคงตัวที่ดี มีความหนืดต่ำกว่ากัมอะราบิก และมีความสามารถในการละลายสูง ทำให้มีอัตราการทำแห้งได้เร็วกว่า มีรายงานการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของแป้ง OSA ในการเป็นสารห่อหุ้มเปรียบเทียบกับเด็กซ์ตรินและกัมอะราบิก (ดังตารางที่ 2.4) โดยใช้ไขมันหอมระเหยจากมะนาวเป็นตัวทดสอบและใช้เทคนิคสเปรย์ดรายในการทำแห้ง พบว่าแป้ง OSA มีประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยที่ดี มีการสูญเสียสารในระหว่างการทำสเปรย์ดรายต่ำ และน้ำมันที่ผิวหน้า

ที่จะถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายต่ำ แสดงว่าแป้ง OSA มีประสิทธิภาพในการเป็นสารห่อหุ้มที่ดีกว่าเด็กซ์ตริน และกัมอาราบิก

ตารางที่ 2.4 ประสิทธิภาพของการเอนแคปซูเลชันด้วยสารเคลือบชนิดต่างๆ

สารห่อหุ้ม	ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่อยู่สารห่อหุ้ม (%)		การสูญเสียสารในระหว่างการทำสเปรย์กระจาย(%)	น้ำมันหอมระเหยที่ผิวหน้า(%)	น้ำมันหอมระเหยที่เหลืออยู่ (%)
	สารเริ่มต้น	กักเก็บสาร			
เด็กซ์ตริน	30.7	23.5	23.6	25.6	17.4
แป้ง OSA	30.1	30.0	0.3	1.0	29.4
กัมอาราบิก	30.5	28.7	5.9	16.5	23.9

ที่มา : Wurzburg 1986

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้แป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกทินิลซัลฟอนิกแอนไฮไดรด์ (แป้ง Hi-cap100) เป็นวัสดุห่อหุ้มสารประกอบที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพ พบว่าเมื่อใช้แป้ง Hi-cap100 ในการห่อหุ้มสารเคอร์คูมิน จะทำให้ละลายน้ำได้เพิ่มมากขึ้นถึง 1670 เท่า เมื่อเทียบกับสารที่ไม่ได้ถูกห่อหุ้ม และเมื่อนำเคอร์คูมินที่ห่อหุ้มด้วยแป้ง Hi-cap100 ไปทดสอบกิจกรรมการยับยั้งเซลล์มะเร็ง พบว่ามีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น (Yu และ Huang 2010) ส่วนการใช้แป้ง Hi-cap100 ในการห่อหุ้มสารเมนทอล พบว่าสามารถกักเก็บสารเมนทอลได้ดีกว่าการใช้กัมเป็นวัสดุห่อหุ้ม (Sootitawat และคณะ, 2005) และการใช้แป้ง Hi-cap100 ร่วมกับมอลโตเด็กซ์ตรินเป็นตัวห่อหุ้มสารลิโมนีน พบว่าสามารถกักเก็บสารลิโมนีนได้ดีกว่าการใช้เวย์โปรตีนกับมอลโตเด็กซ์ตริน (Jafari และคณะ, 2007) ผลการทดลองเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าแป้ง Hi-cap100 เป็นสารห่อหุ้มสารที่มีประสิทธิภาพสูง

สีอิมัลชัน

สีอิมัลชัน คือ สีที่มีสิ่งนำสีเป็นอิมัลชันของสารยึดกับน้ำ อาจเรียกสีอิมัลชันว่า สีลาเท็กซ์ หรือสีน้ำพลาสติก และสามารถแห้งได้เองในอากาศ ใช้สำหรับเคลือบ (ทา พื้น ฯลฯ) ภายนอกและภายในอาคาร รวมถึงสีที่ใช้รองพื้นสำหรับงานปูน ซึ่งแป้ง OSA มีคุณสมบัติเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์จึงมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตสีด้วย

การคำนวณค่าระดับการแทนที่ (Degree of substitution)

ปริมาณการแทนที่ของหมู่ออกทินิลซัคซินิกลภายในเม็ดแป้งแสดงโดยค่าระดับการแทนที่ (degree of substitution, DS) ซึ่งหมายถึง จำนวนโดยเฉลี่ยของหมู่ไฮดรอกซิลในหน่วยกลูโคสที่ถูก derivatize ด้วย หมู่แทนที่ หรือแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$DS = \frac{\text{จำนวนโมลของหมู่แทนที่}}{\text{จำนวนโมลของแอนไฮโดรกลูโคส}}$$

กลูโคสในโมเลกุลแป้งมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่ได้ 3 หมู่คือ คาร์บอนตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 ถ้าหมู่ไฮดรอกซิลทั้ง 3 หมู่ถูกแทนที่ จะมีค่า DS เท่ากับ 3 ถ้าแทนที่ 2 หมู่ จะมีค่า DS เท่ากับ 2 และแทนที่ 1 หมู่มีค่า DS เท่ากับ 1 ดังนั้นค่า DS จะบ่งบอกถึงจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่เท่านั้น แต่ไม่ระบุถึงตำแหน่งที่ถูกแทนที่ การแสดงค่า DS จะเป็นการแสดงค่าเฉลี่ยของทั้งกลุ่มโมเลกุล และมีค่ามากที่สุด = 3 ในกรณีของแป้ง OSA สมการที่ใช้คำนวณค่า DS คือ

$$DS = \frac{162 \times (A \times M)/W}{1 - [0.210 \times (A \times M)/W]}$$

A = ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต (มิลลิลิตร)

M = ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (นอร์มอล)

W = น้ำหนักแห้งของตัวอย่างแป้งออกเทนิลซัคซินิเดที่นำมาไทเทรต (กรัม)

(รายละเอียดที่มาของสมการแสดงในภาคผนวก ก)

สำหรับประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาคำนวณได้จากสมการ

$$\text{ประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยา (\%)} = \frac{\text{Actual DS} \times 100}{\text{Theoretical DS}}$$

JECFA (1997) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับแป้ง OSA ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารคือ ปริมาณ OSA ในแป้งต้องไม่เกิน 3% และปริมาณกรด octenylsuccinic ที่เหลือต้องไม่เกิน 3%

2.3.2 การดัดแปรแป้งโดยใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น (Hydrothermal modification)

การดัดแปรแป้งให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการสามารถทำได้โดยใช้วิธีการทางเคมี (chemical modification) หรือวิธีการทางกายภาพ (physical modification) วิธีการทางกายภาพ เช่น การใช้ความร้อน ความดัน การใช้รังสี เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมมากขึ้นในการดัดแปรแป้งที่ต้องการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร เนื่องจากในกระบวนการไม่มีการใช้สารเคมี การดัดแปรแป้งโดยการใช้น้ำร่วมกับการให้ความร้อน (hydrothermal treatment) เป็นวิธีการหนึ่งที่มีการศึกษาวิจัยกันมาก กระบวนการนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แอนนิวาลิง (annealing) เป็นการให้ความร้อนกับแป้งที่มีปริมาณน้ำมากเกินไป โดยใช้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจล (อุณหภูมิที่ใช้ในการดัดแปรอยู่ที่ประมาณ 50-60 องศาเซลเซียส) อีกประเภทหนึ่งคือ การดัดแปรด้วยความร้อนชื้น (heat-moisture treatment; HMT) เป็นการให้ความร้อนกับแป้งที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจล (100-120 องศาเซลเซียส) โดยแป้งมีความชื้นจำกัด (โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 18-35%) ซึ่งจากรายงานที่ผ่านมาพบว่า การดัดแปรด้วยความร้อนชื้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งมากกว่าการแอนนิวาลิง โดยทั่วไปการดัดแปรแป้งโดยการใช้น้ำร่วมกับการให้ความร้อนจะทำให้การพองตัวของเม็ดแป้งลดลง อุณหภูมิในการเกิดเจลสูงขึ้น แป้งมีความหนืดและการแตกของเม็ดแป้งลดลง ซึ่งระดับการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ขึ้นกับชนิดของแป้งและสภาวะการดัดแปร (ความชื้น อุณหภูมิและระยะเวลาการดัดแปร) ส่วนรูปร่างลักษณะของเม็ดแป้งพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก (Hoover และ Vasanathan, 1994; Hoover และ Manuel, 1996; Jacobs และคณะ, 1998; Stute, 1992; Waduge และคณะ, 2006; Khunaea และคณะ, 2007; Watcharatwinkul และคณะ, 2009) และการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งคาดว่าจะเกี่ยวข้องกับการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลแป้งภายในเม็ดแป้ง โดยมีข้อมูลสนับสนุนจากลักษณะโครงสร้างผลึกในแป้งที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการดัดแปร จากการศึกษาคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นด้วยเครื่อง RVA หรือ Brabender จากตัวอย่างแป้งหลายชนิดเช่น แป้งจากขนุน (breadfruit) (Adebowale และคณะ, 2005a) แป้งจากโคโคแยม (Lawal, 2005) แป้งข้าวโพด แป้งข้าวโพดข้าวเหนียว (Hoover และ Manuel, 1996b) แป้งมันฝรั่ง (Hoover และ Vasanathan, 1994; Kulp และ Lorenz, 1981b) แป้งข้าวโอ๊ต ข้าวฟ่าง และมันเทศ (Hoover และ Vasanathan, 1994) พบว่าแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นมีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดสูงขึ้น แต่ค่าความหนืดสูงสุดลดลง ค่า setback ลดลง นอกจากนี้ในการดัดแปรแป้ง เมื่อปรับความชื้นของแป้งเพิ่มขึ้นพบว่า ค่าความหนืดสูงสุดและค่า setback จะลดลง (Adebowale และคณะ, 2005b; Lawal, 2005)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แป้งพุทธรักษากินได้

พุทธรักษากินได้ (edible canna) เป็นพืชเขตร้อนที่มีปริมาณแป้งในเหง้ามาก จัดเป็นพืชที่ทนต่อสถานะแล้ง ทนต่อศัตรูพืชและโรคพืช สามารถปลูกได้ปริมาณเหง้าต่อไร่สูง มนุษย์นำพุทธรักษามาใช้ประโยชน์ก่อนพืชอาหารแป้งอื่นๆ ในประเทศไทยพบพุทธรักษาอยู่ 2 สายพันธุ์คือ พุทธรักษากินได้พันธุ์ไทยเขียว (Thai-green) ซึ่งเป็นพันธุ์ที่มีใบสีเขียวและพุทธรักษากินได้พันธุ์ไทยม่วง (Thai-purple) ซึ่งเป็นพันธุ์ที่มีใบสีม่วง พุทธรักษากินได้ทั้ง 2 สายพันธุ์ให้ผลผลิตเหง้าสูงถึง 7-10 ตัน/ไร่ (สุพจน์ เฟื่องฟูพงษ์ และรัชดา ทนวิฑูว์ตร, 2540) เหง้าที่ได้สามารถนำมาบริโภคได้โดยการนำมาต้มหรือนึ่งให้สุก แต่เนื่องจากเหง้าของพุทธรักษาที่มีปริมาณเส้นใยสูงจึงไม่นิยมนำมาบริโภคด้วยวิธีการดังกล่าว เหง้าของพุทธรักษาจึงได้จึงถูกนำมาสกัดแป้งเพื่อใช้ผลิตเป็นอาหาร

Inatsu และคณะ (1983) ศึกษาคุณสมบัติของแป้งพุทธรักษาที่ผลิตจากประเทศไทยได้พบว่า มีปริมาณอะไมโลส 27.1% ขนาดของอะไมโลส 3,100 dp มีปริมาณฟอสฟอรัสใกล้เคียงกับแป้งมันฝรั่ง (520 ppm) แต่มีแคลเซียม 250 ppm ซึ่งสูงกว่าแป้งมันฝรั่งมาก เมื่อตรวจสอบความหนืดด้วยเครื่อง brabender พบว่าแป้งพุทธรักษามีความหนืดค่อนข้างคงที่ มีค่า breakdown ต่ำ ทั้งนี้อาจเนื่องจากแคลเซียมที่มีอยู่ในแป้งสามารถจับหมู่ฟอสเฟตที่อยู่ในสายโซ่ของแป้งที่อยู่ติดกันทำให้เกิดการยึดกันระหว่างสายแป้ง (cross-link) เมื่อแป้งพุทธรักษาพองตัวได้น้อยลงและแตกยากขึ้น ปริมาณแคลเซียมในแป้งอาจขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำและดินที่ใช้ในการเพาะปลูก

Lai และ Tsai (1990) รายงานการเพาะปลูกและการผลิตแป้งจากพุทธรักษากินได้ในไต้หวัน (ในประเทศไต้หวันจะเรียกหัวของต้นพุทธรักษาว่า “lotus tuber”) ในปี 1976-1980 มีพื้นที่การผลิตต้นพุทธรักษาทั่วประเทศรวม 583 - 840 เฮกเตอร์ เกษตรกรจะส่งหัวพุทธรักษาเข้าโรงงานเพื่อทำการสกัดแป้ง แป้งที่ได้นำมาใช้ในการผลิตอาหารเส้น (chinese noodle) ใช้ทำเค้กและใช้เป็นแป้งในการประกอบอาหาร

Soni และคณะ (1990) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งพุทธรักษาเปรียบเทียบกับแป้งข้าวโพด พบว่าแป้งพุทธรักษา มีองค์ประกอบของโปรตีน ไขมัน เถ้า และฟอสฟอรัสในปริมาณที่ต่ำ แต่มีอะไมโลสสูงมาก (38%) แป้งพุทธรักษา มีความสามารถในการจับกับน้ำ (water binding capacity) ต่ำ

อาจเนื่องจากเม็ดแป้งมีการจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นทำให้น้ำซึมผ่านเข้าไปได้ยาก ส่วนอุณหภูมิในการเกิดเจล (gelatinization temperature) ต่ำกว่าแป้งข้าวโพดแต่มีค่ากำลังการพองตัว (swelling power) และความสามารถในการละลายสูงกว่าแป้งข้าวโพด และมีความหนืดสูงกว่าแป้งข้าวโพดถึง 3 เท่า และเกิดการกินตัวของแป้งได้ดีกว่าแป้งข้าวโพด

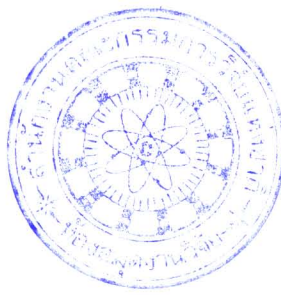
Perez และคณะ (1997) ได้ศึกษาคุณสมบัติบางประการของแป้งพุทธรักษาเปรียบเทียบกับแป้ง arrowroot (*Maranta* sp.) พบว่าแป้งพุทธรักษามีความหนืดสูงกว่าแป้ง arrowroot มาก breakdown มีค่าต่ำ จึงเหมาะที่จะนำแป้งพุทธรักษาไปผลิตเป็นสารให้ความเหนียว (thickener) ในอุตสาหกรรมการผลิตซอส และน้ำสลัด

Perez และคณะ (1998) ได้ศึกษาความแตกต่างของการเกิดเจลระหว่างแป้งมันสำปะหลัง แป้งพุทธรักษาและแป้ง arrowroot พบว่าแป้งพุทธรักษาและ arrowroot ให้แป้งเปียกที่มีความใสเท่าแป้งมันสำปะหลังแต่มีความหนืดสูงกว่าและให้เจลที่แข็งแรงกว่าแป้งมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นเดียวกัน

Kasemsuwan และคณะ (1999) ตรวจวัดปริมาณอะไมโลสโดยวิธี iodine affinity ในแป้งชนิดต่างๆ รวมถึงแป้งพุทธรักษาได้ พบว่าแป้งพุทธรักษา มีปริมาณ apparent amylose 43.2% และมี absolute amylose 22.7%

Sriroth และคณะ (2001) ได้ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งพุทธรักษา พบว่าแป้งพุทธรักษา มีขนาดเม็ดแป้ง 40-60 μm มีปริมาณอะไมโลส 26% มีความยาวของสายอะไมโลส (degree of polymerization) 1150-1330 เมื่อศึกษาพฤติกรรมความหนืดโดยเครื่อง RVA ที่ความเข้มข้น 6 % (w/w) พบว่าแป้งมีอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด 67-70 องศาเซลเซียส ความหนืดสูงสุด 584 RVU ความหนืดสุดท้าย 287 RVU อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลาติไนซ์ (T_0) 61 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เกิดเจลาติไนซ์สูงสุด (T_p) 66 องศาเซลเซียส มีความใสของแป้งเปียก 92-94% light transmittance มีความขาว (kett scale) 81-84 และเอนทาลปีของการเกิดเจลาติไนซ์ 18 J/g

วัชรินทร์ จันทสุวรรณ (2544) ศึกษาสมบัติของแป้งพุทธรักษา 2 สายพันธุ์ คือ พันธุ์ไทยเขียว และพันธุ์ไทยม่วง พบว่าช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนซ์ของแป้งพุทธรักษาได้พันธุ์ไทยเขียว และพันธุ์ไทยม่วง คือ 70-80 องศาเซลเซียส เมื่อศึกษาพฤติกรรมความหนืดโดยเครื่อง brabender amylograph ที่ความเข้มข้น 6% (w/w) พบว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดของแป้งพุทธรักษาทั้งสองสาย



พันธุ์ คือ 71.4 และ 71.8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ มี peak viscosity สูงอยู่ในช่วง 850.5 - 1225.0 B.U. และมีค่า setback ที่สูงคือ พันธุ์ไทยเขียวเป็น 683.5 B.U. และพันธุ์ไทยม่วงเป็น 624 B.U. ซึ่งบ่งชี้ว่าแป้งพุทธรักษาเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือเกิดการคืนตัวได้สูง

Thitipraphunkul และคณะ (2003a) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของแป้งพุทธรักษาพบว่าแป้งพุทธรักษาสายพันธุ์ญี่ปุ่นเขียว ไทยเขียวและไทยม่วง มีปริมาณโปรตีน 0.069-0.078% ไขมัน 0.014-0.019% และเถ้า 0.25-0.33% (w/w) แป้งพุทธรักษาที่มีปริมาณของฟอสฟอรัส 371-399 ppm แคลเซียม 113-154 ppm และโพแทสเซียม 35-61 ppm และโครงสร้างผลึกของแป้งมีลักษณะเป็นแบบ B-type

Thitipraphunkul และคณะ (2003b) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินของแป้งพุทธรักษา พบว่าอะไมโลสของแป้งพุทธรักษาพันธุ์ไทยม่วงมี degree of polymerization (DPn) 1590 พันธุ์ญี่ปุ่นเขียว 1620 และพันธุ์ไทยเขียว 1650 อะไมโลเพกตินของแป้งพุทธรักษาที่มีปริมาณของฟอสฟอรัสสูง (391-420 ppm) และจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง differential scanning calorimeter (DSC) แสดงให้เห็นว่ามีโครงสร้างของเม็ดแป้งที่แข็งแรง

ฤทัยภักดิ์ ชาญศิริ (2545) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของแป้งพุทธรักษา 3 สายพันธุ์ พบว่าพันธุ์ไทยม่วงมีความชื้น 11.01% มีปริมาณแป้ง 92.05% ไขมัน 0.04% โปรตีน 0.39% ฟอสฟอรัส 0.01% และเถ้า 0.02% โดยน้ำหนักแห้ง พันธุ์ไทยเขียวมีความชื้น 11.56% มีปริมาณแป้ง 95.22% ไขมัน 0.04% โปรตีน 0.40% ฟอสฟอรัส 0.08% เถ้า 0.18% โดยน้ำหนักแห้ง และพันธุ์ญี่ปุ่นเขียวมีความชื้น 9.56% มีปริมาณแป้ง 98.34% ไขมัน 0.04% โปรตีน 0.36% ฟอสฟอรัส 0.05% และเถ้า 0.17% โดยน้ำหนักแห้ง เมื่อศึกษาพฤติกรรมความหนืดโดยเครื่อง RVA ที่ความเข้มข้น 6% w/w พบว่าแป้งมีอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) ที่ 73.6-74.3 องศาเซลเซียส เม็ดแป้งมีการพองตัวจำกัด มี peak viscosity สูงอยู่ในช่วง 121-145.5 RVU ไม่พบค่า breakdown ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเม็ดแป้งมีความแข็งแรงและทนต่อการกวนและมีค่า setback สูง (พันธุ์ไทยม่วงมีค่า 99.1 RVU พันธุ์ไทยเขียวมีค่า 90 RVU และพันธุ์ญี่ปุ่นเขียวมีค่า 73.4 RVU) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแป้งพุทธรักษามีการคืนตัวของแป้งสูง

สายตะวัน เถียวสุด (2547) ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของแป้งพุทธรักษาพันธุ์ไทยม่วง พบว่าแป้งพุทธรักษาที่มีปริมาณอะไมโลส 27.93% ฟอสฟอรัส 454 ppm และมีปริมาณเถ้า โปรตีน ไขมันเพียงเล็กน้อย เจลแป้งมีลักษณะการพองตัวและแตกตัวของเม็ดแป้งมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่น้ำแป้ง เมื่อวิเคราะห์โดยใช้ x-ray diffraction pattern พบว่าลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบ B-type

การดัดแปรแป้งโดยใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น

Abraham (1993) พบว่าแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้ความร้อนขึ้นจะมีความทนต่อการแช่เยือกแข็งและการละลายที่ดี เมื่อนำไปใช้เป็นส่วนหนึ่งของไส้พาย พบว่าทำให้ได้คุณสมบัติทางประสาทสัมผัสและการยอมรับที่ดีจากผู้บริโภค

Hoover และ Manuel (1996) ได้ทำการดัดแปรแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสแตกต่างกัน โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความชื้น 30% เป็นระยะเวลา 16 ชั่วโมง แล้วนำแป้งที่ผ่านการดัดแปรไปตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าการให้ความร้อนขึ้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้ง เช่นเดียวกับการทดลองของ Lawal (2005) ที่ศึกษาผลของการให้ความร้อนขึ้นแก่นิวโคโคแยม (new cocoyam) อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 16 ชั่วโมง โดยแปรผันความชื้นของแป้งร้อยละ 18-27 และพบว่าการเปลี่ยนแปลงระดับความชื้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของเม็ดแป้ง

Gunaratne และ Hoover (2002) ได้ศึกษาแป้งข้าวโพดชนิดต่างๆ (waxy maize, normal maize, dull waxy maize และ amylo maize) เมื่อนำไปผ่านการให้ความร้อนขึ้น พบว่าแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B (เกิดที่ค่าความหนืด 5.5, 17, 22-24 องศาเซลเซียส) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกเป็นแบบ A+B และมีร้อยละความเป็นผลึกลดลง ซึ่งเกิดจากการดีไฮเดรชัน (dehydration) คือการระเหยน้ำในช่องตรงกลางของโครงสร้างผลึกแบบ B ซึ่งปกติโครงสร้างแบบ B สามารถจับน้ำได้ 36 หน่วยต่อ 1 หน่วยเซลล์ จึงส่งผลทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของสายเกลียวคู่ไปที่ส่วนบริเวณส่วนกลางของโครงสร้าง (central channel) หลังจากการระเหยน้ำออก การเคลื่อนที่ของสายเกลียวคู่จะส่งผลต่อการทำลายโครงสร้างผลึก หรือทำให้เกิดการจัดเรียงตัวแบบใหม่ ส่วนแป้งที่มีโครงสร้างแบบ A จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก เนื่องจากความสามารถในการจับน้ำบริเวณตรงกลางโครงสร้างผลึกมีปริมาณน้อยกว่า (4 หน่วยต่อ 1 หน่วย) จึงไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง

Adebowale และ Lawal (2003) ศึกษาผลของการดัดแปรแป้งถั่ว (mucuna bean) ด้วยความร้อน พบว่าการพองตัวของแป้งที่ผ่านการดัดแปรต่ำกว่าแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปรและเมื่อเพิ่มความชื้นในการดัดแปรมีผลทำให้การพองตัวและการละลายของแป้งลดลง

Adebowale และคณะ (2005a) ได้ทำการดัดแปรแป้งข้าวฟ่าง ที่ระดับความชื้น 25 และ 30% โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 16 ชั่วโมง พบว่าที่ระดับการดัดแปรที่ความชื้น 30% มีการเกิดรอยแตกในโครงสร้างของเม็ดแป้งเล็กน้อย

Anderson และ Guraya (2005) ได้ดัดแปรแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวด้วยความร้อนชื้น โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ พบว่าหลังการดัดแปรลักษณะทางสัญญาณของเม็ดแป้งโดยส่วนใหญ่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่พบว่ามีบางส่วนเกิดการรวมกลุ่มกัน (aggregation) ทั้งในแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว

Vernfeylen และคณะ (2006) ศึกษาผลของการดัดแปรแป้งมันฝรั่งด้วยความร้อนชื้น โดยใช้สภาวะในการดัดแปรคือ ความชื้น 17-26% อุณหภูมิ 90-130 องศาเซลเซียส ให้ความร้อนนาน 24 ชั่วโมง พบว่าแป้งมันฝรั่งมีโครงสร้างผลึกเปลี่ยนไปจากแบบ B เป็น B+A และเมื่อให้ความร้อนในระดับที่สูงขึ้นคือ 130 องศาเซลเซียส ลักษณะของโครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนมาเป็นแบบ A ทั้งหมด

การดัดแปรแป้งพุทธรักษาและสมบัติทางเคมีกายภาพ

Saaratrat และคณะ (2005) ทำการดัดแปรแป้งพุทธรักษาด้วยวิธีเอชทีเลชัน โดยมีหมู่แทนที่ร้อยละ 1.41, 2.05 และ 2.55 พบว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดลดลง 4-6 องศาเซลเซียส ความหนืดสูงสุดลดลงเล็กน้อยแต่มีค่า setback ลดลงอย่างชัดเจน และเมื่อทดสอบความคงตัวต่อแรงเฉือนและกรดพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ ค่าความหนืดและค่า setback ลดลง แต่ค่า breakdown เพิ่มขึ้น และทดสอบความคงตัวของแป้งต่อการแช่เยือกแข็งและละลาย พบว่าแป้งพุทธรักษาที่ดัดแปรที่มีปริมาณน้ำที่แยกออกมาน้อยกว่า แสดงว่ามีการเกิดรีโทรเกรเดชันลดลงและมีเนื้อสัมผัสที่นุ่มกว่าแป้งธรรมชาติ

Chuenkamol และคณะ (2007) ทำการดัดแปรแป้งพุทธรักษาด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิลเลชันที่ระดับการแทนที่ (molar substitution) 0.01, 0.02, 0.03, 0.07 และ 0.11 พบว่าลักษณะเม็ดแป้งไม่เปลี่ยนแปลง แป้งดัดแปรที่มีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดและ setback ลดลง แต่มีความหนืดสูงสุดและ breakdown เพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทดสอบความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลาย พบว่าแป้งดัดแปรมี % syneresis ลดลงโดยที่แป้งที่ระดับการแทนที่ 0.11 ไม่พบการเกิด syneresis เมื่อผ่านการแช่แข็งและละลาย 4 รอบ เป็นเวลา 14 วัน ในขณะที่แป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีค่า % syneresis ประมาณ 50-55 % (w/w)

Watcharatewinkul และคณะ (2009) ทำการดัดแปรแป้งพุทธรักษาด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น โดยใช้อุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมงที่ระดับความชื้นของแป้ง 15, 18, 20, 22 และ 25% พบว่าขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งรวมทั้ง crystalline pattern ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่คุณสมบัติทางด้านความหนืด ลักษณะของเจลแป้ง ค่าความจุความร้อน และความยาวของอะไมโลสมีการเปลี่ยนแปลงไปจากแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร โดยมีค่าความหนืดลดลง มีความคงตัวสูงและอุณหภูมิของการเจลาติไนเซชันเพิ่มขึ้น ส่วนการเกิดรีโทรเกรเดชันลดลง ซึ่งการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นจะส่งผลให้แป้งดัดแปรที่ได้มีคุณสมบัติคล้ายกับการดัดแปรด้วยวิธีการครอสลิงค์

การดัดแปรแป้งและคุณสมบัติของแป้งดัดแปรด้วย OSA

Shogren และคณะ (2000) ศึกษาการกระจายตัวของหมู่ OSA ในแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว พบว่า หมู่ OSA มีกระจายตัวอยู่ทั้งภายในและที่บริเวณผิวของเม็ดแป้ง แต่ที่บริเวณผิวจะมีระดับการแทนที่ที่สูงกว่าภายใน (มีหมู่ OSA มากกว่า) โดยในเม็ดแป้งหมู่ OSA จะกระจายอยู่ในส่วนอสัณฐาน (amorphous domains) ของอะไมโลเพกติน แต่ไม่สามารถเข้าไปเกิดปฏิกิริยากับสายโซ่อะไมโลเพกตินที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ (crystalline domains) การพบหมู่แทนที่ที่ผิวเม็ดแป้งมากกว่าภายในเนื่องมาจาก OSA มีความสามารถในการละลายในน้ำต่ำ ดังนั้นอาจมีส่วนหนึ่งของ OSA ที่อยู่ในรูปของ droplet ซึ่ง droplet ที่มีขนาดใหญ่จะผ่านเข้าไปยังภายในเม็ดแป้งไม่ได้ ทำให้ภายนอกเม็ดแป้งมีปริมาณ OSA มากกว่าภายใน จึงเกิดปฏิกิริยาได้มากกว่า

Shih และ Daigle (2003) ศึกษาคุณสมบัติของแป้งข้าวที่ผ่านการดัดแปรด้วย OSA โดยใช้ OSA ที่ความเข้มข้น 3, 5, และ 10% ทำให้ได้ระดับการแทนที่ 0.016, 0.033, 0.070 ตามลำดับ พบว่าแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วย OSA จะมีการพองตัวและความหนืดเพิ่มสูงขึ้น อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดลดลงจาก 88.7 เป็น 51.5 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์ (gelatinization temperature) ลดลงจาก 68.5 เป็น 63.2 องศาเซลเซียส

Bhosale และ Singhal (2006) ศึกษาสถานะ (สัดส่วนของ OSA ต่อแป้ง pH อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา) ที่เหมาะสมในการเตรียมแป้งออกทินิลซัคซินेट พบว่าสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมแป้งออกทินิลซัคซินेटจากแป้งอามาแรนซ์ (amaranth starch) คือ OSA 3% (w/w แป้ง) ทำปฏิกิริยาที่ 30 องศาเซลเซียส, pH 8.0 เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้แป้งที่ความเข้มข้น 25% สำหรับแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว

มีสถานะที่เหมาะสมเช่นเดียวกับแป้งอามาแรนที่ ยกเว้นระยะที่ใช้ในการตัดแปรจะนานกว่าคือ 24 ชั่วโมง แป้ง OSA คัดแปรโดยใช้ OSA ความเข้มข้น 1, 2 และ 3% มีความสามารถในการเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ และความสามารถในการดูดซับน้ำมันไม่แตกต่างกัน

He และคณะ (2006) ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของแป้งข้าว 7 สายพันธุ์ ที่มีปริมาณอะไมโลสต่างกันที่ผ่านการตัดแปรด้วย OSA พบว่าปริมาณอะไมโลสที่สูงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยแป้งข้าวคัดแปรด้วย OSA ที่มีปริมาณอะไมโลสเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 39.6% มีระดับการแทนที่เพิ่มขึ้นจาก 0.024 เป็น 0.030 และมีค่าประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 62.5 เป็น 77.5% เนื่องจากอะไมโลสอยู่ในส่วนออสันฐานของเม็ดแป้งทำให้เกิดการแทนที่ได้ง่าย เมื่อนำแป้งที่ได้ไปศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกโดยใช้เครื่อง X-ray diffraction พบว่าลักษณะโครงสร้างผลึกไม่เปลี่ยนแปลง แป้ง OSA มีค่า peak viscosity สูงกว่าแป้งดิบ และแป้งคัดแปรที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะมี peak viscosity, breakdown และ setback ต่ำกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ

Song และคณะ (2006a) ศึกษาสถานะ (สัดส่วนของ OSA ต่อแป้ง pH อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา) ที่เหมาะสมในการเตรียมแป้งข้าวคัดแปรด้วย OSA พบว่าสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมแป้ง OSA คือ OSA 3% (w/w แป้ง) ทำปฏิกิริยาที่ 35 องศาเซลเซียส, pH 8.5 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้แป้งที่ความเข้มข้น 35% ทำให้มีระดับการแทนที่ (DS) 0.018 และประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา 78% ลักษณะของเม็ดแป้งพบว่ามีรูพรุนเล็กน้อย แต่โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งไม่มีการเปลี่ยนแปลง และการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในแป้งข้าวคัดแปรด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectrometer พบว่าแป้งคัดแปรมีฟิสิกัลใหม่เกิดขึ้นที่ 1724 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ ester carbonyl group สำหรับการเปลี่ยนแปลงความหนืดพบว่าแป้งที่ผ่านการคัดแปรมี peak viscosity สูงขึ้น (142.6 -453.2 RVU)

Song และคณะ (2006b) ศึกษาสถานะ (สัดส่วนของ OSA ต่อแป้ง pH อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา) ที่เหมาะสมในการเตรียมแป้งข้าวคัดแปรด้วย OSA และคุณสมบัติของเจลแป้งพบว่าสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมแป้งออกทินิลซัคซิเนต คือ ใช้แป้งที่ความเข้มข้น 36.8% (w/w) OSA 3% (w/w แป้ง) ทำปฏิกิริยาที่ 33.4 องศาเซลเซียส, pH 8.4 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำให้ได้ระดับการแทนที่ (DS) 0.0188 และประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา 81% แป้งที่ได้มีความหนืดสูงขึ้น เจลแป้งมีลักษณะใสมากขึ้น และแป้งมีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งดีขึ้น

Thirathumthavorn และ Charoenrein (2006) ศึกษาคุณสมบัติด้านความหนืดและคุณสมบัติด้านความร้อนของแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวที่ผ่านการดัดแปรด้วย OSA พบว่าแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วย OSA มีค่า peak viscosity, final viscosity และ setback สูงกว่าแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร อาจเนื่องจาก 1) แป้ง OSA มีการพองตัวได้สูงกว่าแป้งดิบ การแทนที่ด้วยหมู่ออกซิเจนในโมเลกุลของแป้งทำให้น้ำซึมเข้าสู่เม็ดแป้งได้มากขึ้น 2) hydrophobic interaction คือ มีแรงกระทำระหว่างหมู่ไฮโดรโฟบิกของ OSA และ 3) เกิดสารเชิงซ้อนของอะไมโลสกับหมู่ OSA (amylose-OA complex) สำหรับอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเจลไดโนซ์และค่าพลังงานในการเกิดเจลไดโนซ์ของแป้ง OSA พบว่ามีค่าลดลง

Bhosale และ Singhal (2007) ศึกษาคุณสมบัติทางด้านเคมีกายภาพของแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวและแป้งอามาแรนที่ดัดแปรด้วย OSA ที่ความเข้มข้นของ OSA 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3% พบว่าแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวมีระดับการแทนที่เท่ากับ 0.0062, 0.0089, 0.0159, 0.0183, และ 0.0206, ตามลำดับ และแป้งอามาแรนมีระดับการแทนที่เท่ากับ 0.0072, 0.0084, 0.0165, 0.0175, และ 0.0203 ตามลำดับ การดัดแปรแป้งด้วย OSA ที่ความเข้มข้นสูงขึ้นทำให้แป้งมีการพองตัวเพิ่มขึ้นเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนบางส่วนถูกทำลายโดยการแทนที่ด้วยหมู่ OSA แป้งดัดแปรมีความหนืดและค่า setback เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ OSA ที่เพิ่มขึ้น โดยแป้งอามาแรนที่ดัดแปรมีความหนืดสูงกว่าแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวดัดแปร ส่วน breakdown ของแป้ง OSA มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของ OSA เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าแป้งดัดแปรมีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งได้ดี โดยแป้งอามาแรนที่ดัดแปรมี % syneresis สูงกว่าแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวดัดแปร แป้ง OSA มีอุณหภูมิในการเกิดเจลไดโนซ์ลดลงและลักษณะโครงสร้างผลึกไม่เปลี่ยนแปลง ผู้วิจัยได้สรุปไว้ว่าแป้งดัดแปรมีคุณสมบัติด้านความหนืดเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็น thickener ในผลิตภัณฑ์ต่างๆได้

Liu และคณะ (2008) ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวดัดแปรด้วย OSA พบว่าสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมแป้ง OSA คือ แป้งที่ความเข้มข้น 31.2% ทำปฏิกิริยาที่ 33.6 องศาเซลเซียส, pH 8.6 เป็นเวลา 18.7 ชั่วโมง ซึ่งจะได้แป้งที่มีระดับการแทนที่สูงสุด 0.0204 พบว่าแป้ง OSA มีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดลดลงและความหนืดสูงขึ้น แต่เมื่อนำแป้ง OSA มาย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสจะทำให้ peak viscosity ลดลง เนื่องจากการใช้เอนไซม์จะเข้าตัดที่พันธะ α -1,4-glycosidic linkage ทำให้ขนาดและน้ำหนักโมเลกุลมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้ตำแหน่งของหมู่แทนที่ที่จับกับโมเลกุลของแป้งจะลดลงด้วย แป้ง OSA ที่ได้มีความสามารถในการเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ที่ดีในของผสมระหว่างน้ำกับน้ำมัน

Hui และคณะ (2009) ศึกษาสภาวะ (สัดส่วนของ OSA ต่อแป้ง pH อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา) ที่เหมาะสมในการเตรียมแป้งมันฝรั่งดัดแปรด้วย OSA พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแป้ง OSA คือ OSA 3% (w/w แป้ง) เจือจาง OSA 5 เท่า ทำปฏิกิริยาที่ 35 องศาเซลเซียส pH 8.0 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยใช้แป้งที่ความเข้มข้น 35% ทำให้ได้ระดับการแทนที่ 0.017 และประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา 72 ± 1.8 % การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในแป้งมันฝรั่งด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FT-IR) พบว่าแป้งดัดแปร มีพีคใหม่เกิดขึ้นที่ 1724 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ ester carbonyl group และแป้งดัดแปร มีความหนืดสูงขึ้น

Zhang และคณะ (2010) ศึกษาการดัดแปรแป้งข้าวด้วยวิธีทางกล (ball milling) จากนั้นนำมาดัดแปรต่อด้วย OSA พบว่าแป้งที่ผ่านการบดด้วย ball milling ก่อนดัดแปรด้วย OSA มีระดับการแทนที่และประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยสภาวะที่เหมาะสมในการดัดแปร คือ แป้งผ่านการบดด้วย ball milling นาน 10 ชั่วโมง และนำมาดัดแปรด้วย OSA โดยใช้แป้งที่ความเข้มข้น 12.5% OSA 3% ทำปฏิกิริยาที่ 35 องศาเซลเซียส pH 8.5 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำให้มีระดับการแทนที่เท่ากับ 0.02037 และมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา 88.03% สำหรับแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วย OSA มีสภาวะที่เหมาะสมเหมือนกับแป้งที่ผ่านการบด แต่วิธีที่ใช้แป้งที่ความเข้มข้น 40% เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำให้มีระดับการแทนที่ 0.017 และมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา 73.46%