

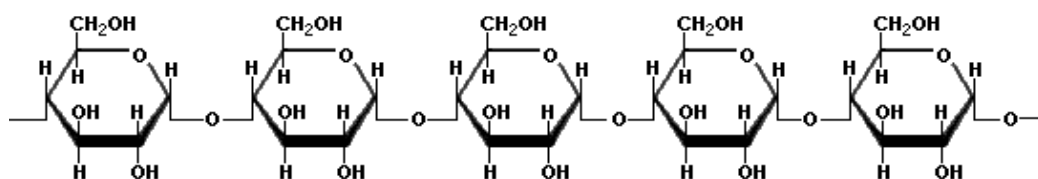
บทที่ 2 ทฤษฎีและตรวจสอบเอกสาร

2.1 แป้ง (starch)

สตาร์ชหรือแป้งเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตพอลิแซ็กคาไรด์ที่เป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคส ซึ่งเกิดจากการเรียงต่อกันของน้ำตาลกลูโคสโดยสูญเสีย น้ำ 1 โมเลกุลต่อ 1 พันธะไกลโคซิดิกที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำตาลกลูโคส 2 โมเลกุล องค์ประกอบของแป้งที่สำคัญคือ อะไมโลสและอะไมโลเพกติน อะไมโลสมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์สายตรงเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4 glycosidic ส่วนอะไมโลเพกตินมีลักษณะเป็นกิ่งก้าน ส่วนที่เป็นเส้นตรงประกอบด้วยน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4 glycosidic ส่วนบริเวณที่เป็นกิ่งจะต่อกันด้วยพันธะ α -1,6 glycosidic (Smith, 1982) ในสภาพธรรมชาติโมเลกุลแป้งจะจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นอยู่ในเม็ดแป้ง (starch granule) โดยจับยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (H-bond) ทั้งภายในและระหว่างโมเลกุล

2.1.1 อะไมโลส (amylose)

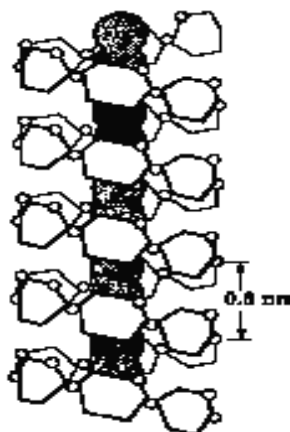
อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 500-6,000 หน่วย ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4 - glycosidic linkage (รูปที่ 2.1) แป้งแต่ละชนิดมีปริมาณของอะไมโลสที่แตกต่างกันออกไป แป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวโพด แป้งข้าวสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมโลสสูง (ประมาณ 25-35%) แป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาเก มีปริมาณอะไมโลสดำกว่า (ประมาณ 15-20%) น้ำหนักของอะไมโลสอยู่ในช่วง 10^5 ถึง 10^6 ดาลตัน ซึ่งอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมีขนาดโมเลกุลของอะไมโลสอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีซึ่งมีขนาดโมเลกุลของอะไมโลสอยู่ในช่วง 200 ถึง 1,200 แป้งที่มีโมเลกุลของอะไมโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ลดลง (Hizukuri, 1986)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของอะไมโลส

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

อะไมโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนและสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น butanol, fatty acid, surfactant, phenol และ hydrocarbon สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้ไม่ละลายในน้ำ โดยอะไมโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์ (Galliard และ Bowler, 1987) ดังรูปที่ 2.2 อะไมโลสที่รวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงิน ซึ่งใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีองค์ประกอบของอะไมโลส



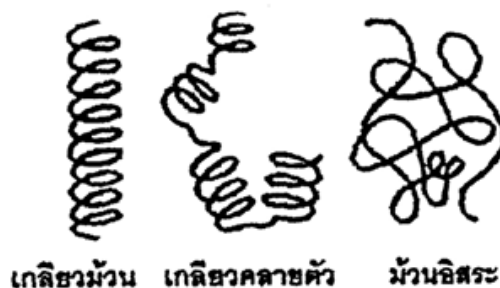
รูปที่ 2.2 ภาพจำลองการจับตัวของอะไมโลสกับสารอินทรีย์

ที่มา : Galliard และ Bowler (1987)

ตำแหน่งของอะไมโลสภายในเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแป้ง อะไมโลสบางส่วนแทรกอยู่ในกลุ่มของอะไมโลเพคติน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (amorphous) และส่วนผลึก (crystallite) ในแป้งสาลีพบอะไมโลสอยู่ในส่วนอสัณฐาน ในแป้งมันฝรั่งพบอะไมโลสอยู่ร่วมกับอะไมโลเพคตินในส่วนผลึก จากการศึกษาการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งมันฝรั่งบ่งชี้ว่าอะไมโลสกระจายอยู่ในส่วนรอบนอกของเม็ดแป้งมากกว่าที่จะอยู่ในส่วนใจกลางเม็ดแป้ง (Jane และ Shen, 1993) อะไมโลสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่จะพบเป็นเกลียวคู่กับอะไมโลเพคตินอยู่ใจกลางเม็ดแป้ง ส่วนอะไมโลสขนาดเล็กจะพบอยู่ตามขอบเม็ดแป้ง (Oates, 1996) จากการศึกษาตำแหน่งของอะไมโลสในแป้งข้าวโพดและแป้งมันฝรั่งโดยการตัดแปรแป้งด้วยวิธีการโครสลิงค์ บ่งชี้ว่าอะไมโลสกระจายอยู่ทั่วไปในส่วนของอะไมโลเพคตินมากกว่าที่จะอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม (Jane และคณะ, 1992; Kasemsuwan และ Jane, 1994)

โครงสร้างของอะไมโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (helix) เกลียวที่คลายตัว (interrupted helix) หรือม้วนอิสระ (random coil) ดังรูปที่ 2.3 ในสารละลายที่อุณหภูมิห้อง อะไมโลสอยู่ในลักษณะเป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คลายตัว อะไมโลสที่มีน้ำหนัก

โมเลกุลตั้งแต่ 6,500 ถึง 160,000 มีโมเลกุลเป็นม้วนอิสระและจะไม่ละลายในสารละลาย สำหรับอะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 อาจจะมีบางส่วนละลายได้ โมเลกุลจะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง (Whistler และ Deniel, 1984)

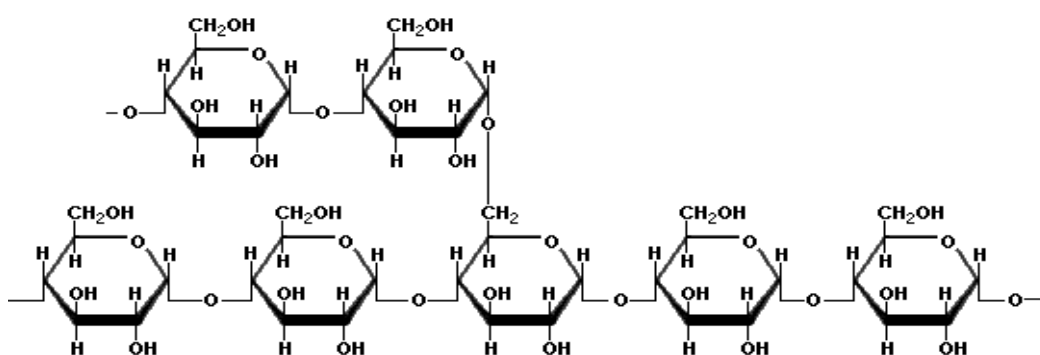


รูปที่ 2.3 ลักษณะเกลียวของอะไมโลส

ที่มา: Whistler และ Deniel (1984)

2.1.2 อะไมโลเพคติน (amylopectin)

อะไมโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นสายตรงเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิด α -1,4 (α -1,4 -glycosidic linkage) และจุดที่แตกกิ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิด α -1,6 (α -1,6 -glycosidic linkage) สายโซ่กิ่งประกอบด้วยกลูโคสในช่วง 6 ถึง 100 หน่วย ลักษณะโมเลกุลของอะไมโลเพคตินแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน

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

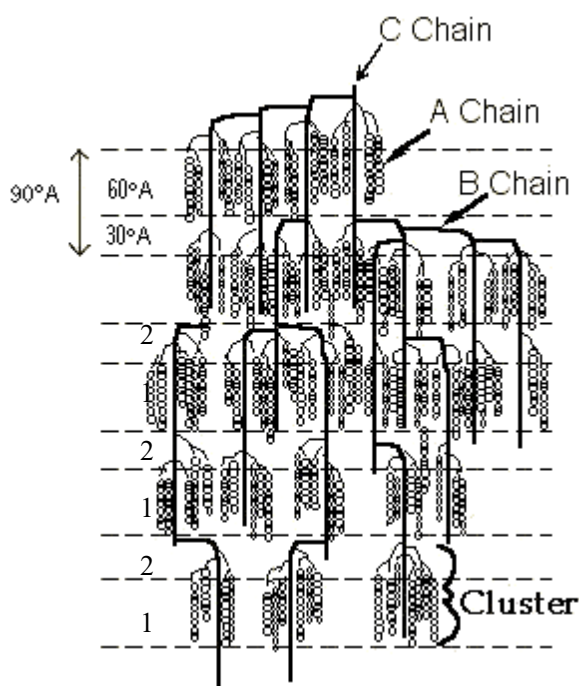
หน่วยกลูโคสที่มีพันธะไกลโคซิดิกชนิด α -1,6 -glycosidic linkage มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสทั้งหมดในอะไมโลเพคติน ขนาดโมเลกุลของอะไมโลเพคตินจะอยู่ในช่วง

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 ส่วนคือ ส่วนที่มีการจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบหรือส่วนผลึก เรียกว่า crystallite region และส่วนที่ไม่เป็นระเบียบหรือส่วนอสัณฐาน เรียกว่า amorphous region แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างอะไมโลเพกตินที่ประกอบด้วยส่วนผลึกและส่วนอสัณฐาน

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

ภายในเมล็ดแป้งประกอบด้วยวงแหวนหนาแน่นที่เรียกว่า growth ring ซึ่งสังเกตได้จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ เม็ดแป้งที่มีขนาดใหญ่ในสภาพเปียกและสดจะสังเกตเห็นวงแหวนได้ง่าย ส่วนในสภาพที่แห้งจะไม่พบวงแหวน สำหรับเม็ดแป้งที่มีขนาดเล็ก เช่น แป้งข้าวบาร์เลย์และแป้งข้าว

เจ้าจะสังเกตจากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้ยาก แต่สามารถสังเกตเห็นได้เมื่อนำแป้งมาผ่านปฏิกิริยาเคมีหรือย่อยด้วยเอนไซม์และศึกษาด้วยกล้อง SEM (French, 1984) จากโครงสร้างของวงแหวนแสดงให้เห็นถึงลักษณะการเจริญของเมล็ดแป้ง โดยเนื้อเยื่อชั้นแรกจะเจริญมาจากศูนย์กลางของเมล็ดแป้ง (hilum) ซึ่งส่วนนี้ประกอบด้วยส่วน reducing end ของโมเลกุลแป้ง และมีส่วนที่เป็น non-reducing end ของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินแผ่กระจายออกไป (Oates, 1997) จุดเชื่อมกิ่ง (branch point) ของอะไมโลเพคตินอยู่ในส่วนอสังฐานและสายโซ่อยู่ในส่วนผลึก (French, 1984)

2.2 สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้ง

2.2.1 ลักษณะของเมล็ดแป้ง

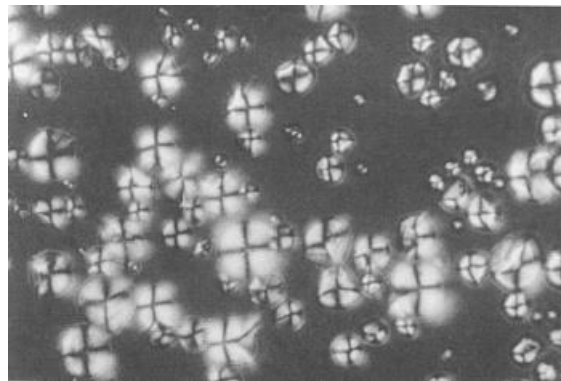
แป้งที่พบทั่วไปในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้ง (granule) ขนาดเล็ก เมื่อตรวจสอบลักษณะของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาและกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน พบว่าเม็ดแป้งมีขนาด รูปร่างและลักษณะที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งของแป้งนั้นๆ ลักษณะของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ

แหล่งแป้ง	ขนาด (μm)	รูปร่าง
ข้าวสาลี	2-35	กลม ค่อนข้างรี
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 ค่อนข้างรี
ลูกเดือย	8-20	กลมแบน มีหลายเหลี่ยม
Triticale	2-35	กลม ค่อนข้างรี
มันฝรั่ง	15-121	กลม รูปไข่มีวงคล้ายเปลือกหอย
มันสำปะหลัง	5-35	กลม คล้ายไข่ที่มีรอยตัด
ท้าวขาม่อม	13-70	รูปไข่
สาเก	15-65	รูปไข่ที่มีรอยตัด

ที่มา: Maningat และ Seib (1992)

สมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของแป้งคือ เม็ดแป้งจะมีโครงสร้างหรือลักษณะที่เรียกว่า ไบรีฟรินเจนซ์ (birefringence) ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งมีความสามารถในการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ได้และเกิดเงากากบาทภายใต้แสงโพลาไรซ์ จุดตัดของกากบาทจะตัดกันที่ตำแหน่ง hilum ของเม็ดแป้ง เม็ดแป้งซึ่งประกอบด้วยอะไมโลสและอะไมโลเพกตินจะเรียงตัวกันในแนวตั้งฉากกับผิวของเม็ดแป้ง เมื่อส่องดูเม็ดแป้งภายใต้แสงโพลาไรซ์พื้นที่ที่มีตกภายในเม็ดแป้งจะเป็นตำแหน่งเกลียวของสายพอลิเมอร์เมื่ออยู่ในลักษณะตั้งฉากหรือขนานกับระนาบแสงโพลาไรซ์ แต่เนื่องจากพื้นผิวของเม็ดแป้งเป็นเส้นโค้ง ดังนั้นจะมีสายพอลิเมอร์บางสายที่ไม่อยู่ในลักษณะตั้งฉากหรือขนานกับระนาบแสงโพลาไรซ์ ทำให้สามารถบิกระนาบแสงและเห็นการส่องสว่างของแสงผ่านทาง nicol prism ตัวที่สอง ความเข้มของไบรีฟรินเจนซ์ขึ้นอยู่กับความหนาของเม็ดแป้ง จำนวนและการจัดเรียงตัวของ crystallite



รูปที่ 2.6 ลักษณะการบิกระนาบแสงโพลาไรซ์หรือไบรีฟรินเจนซ์ของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง
ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546)

2.2.2 ลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง

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

ของรังสีเอ็กซ์และความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก โดยทั่วไปเม็ดแป้งในธรรมชาติ (native starch) จะมีรูปแบบของ X-ray diffraction เป็น 4 ลักษณะดังนี้ (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) ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินโดยสายโพลีเมอร์ของกลูโคสในส่วนที่เป็นเส้นตรงของอะไมโลเพกตินจะสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจน ทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นผลึกที่มีความแข็งแรง ลักษณะเช่นนี้ของเม็ดแป้งจะทำให้เอนไซม์ย่อยแป้งได้น้อยลง โดยแป้งจากธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ซึ่งเป็นแป้งที่มีลักษณะผลึกภายในเป็นแบบ A-type พบว่ามีรูหรือช่องรอบๆ เม็ดแป้ง ซึ่งทำให้เอนไซม์สามารถแทรกผ่านเข้าไปภายในเม็ดแป้งได้และเกิดการย่อยของแป้งจากภายในสู่ภายนอก (Benmoussa และคณะ, 2006; Fannon และคณะ, 1992) ในขณะที่แป้งมันฝรั่งและแป้งที่มีลักษณะผลึกภายในเป็นแบบ B-type พบว่าส่วนใหญ่เม็ดแป้งจะถูกย่อยจากผิวด้านนอกเข้าสู่ด้านใน (Gallant และคณะ, 1997) ดังนั้นแป้งที่ได้จากธัญพืชจึงมักจะถูกย่อยได้ง่ายกว่าแป้งที่สกัดจากหัว (tuber) Jane และคณะ (1997), Srichuwong และคณะ (2005) และ Zhang และคณะ (2006) รายงานว่าแป้งที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A-type จะถูกย่อยได้ง่ายกว่าแป้งชนิด B-type

2.2.3 เจลาตินในเซชัน

กลไกการเกิดเจลาตินในเซชัน

เมื่อนำแป้งใส่ในน้ำเย็น เม็ดแป้งดูดซับน้ำได้ในปริมาณจำกัดปริมาณหนึ่ง ทำให้แป้งมีความชื้นเพิ่มขึ้น แต่จะไม่พองตัวหรือพองตัวได้จำกัดมากและสังเกตได้ยาก Collison (1968) สังเกตการพองตัวของเม็ดแป้งสาลีในน้ำที่อุณหภูมิห้องพบว่า แป้งที่พองตัวมีเส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มขึ้น 10% และปรากฏการณ์นี้สามารถผันกลับได้ (reversible) โดยเมื่อนำไปตากแห้งก็จะได้แป้งที่มีลักษณะและคุณสมบัติเดิม ทั้งนี้ได้อธิบายว่าในสภาวะธรรมชาติในเม็ดแป้งโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพกติน

ในส่วนที่เป็น crystallite จับตัวกันอย่างหนาแน่นแข็งแรง จึงไม่ละลายในน้ำเย็น แต่น้ำอาจจะซึมเข้าไปในส่วนของเม็ดแป้งซึ่งไม่แข็งแรงและมีกลุ่มไฮดรอกซิลอิสระได้บ้าง แต่เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิหนึ่งประมาณ 60-70 °C หรือใช้สารเคมี (Osman, 1967) เช่น ให้ความร้อน 60 °C แก่แป้งสาลี จะมีผลทำให้การจับกันระหว่างโมเลกุลของแป้งในส่วน crystallite คลายตัวลง เกิดปฏิกิริยาการรับน้ำ และเกิดการพองตัวของเม็ดแป้งซึ่งไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible) และทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น กระบวนการนี้เรียกว่า “เจลาติไนเซชัน” ซึ่งเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่สำคัญขึ้นคือ การพองตัวของเม็ดแป้งและเครื่องหมายกากบาทภายในเม็ดแป้งหายไป อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดและสายพันธุ์ของแป้ง อาจเป็นเพราะว่าเม็ดแป้งจากแต่ละสายพันธุ์มีโครงสร้างส่วน crystallite ที่แตกต่างกันทั้งระดับการจับกัน (degree of association) และความสม่ำเสมอของการเกิดเจลาติไนซ์ไม่พร้อมกันทุกเม็ด เม็ดแป้งชนิดเดียวกันจากแหล่งเดียวกัน ปกติจะเกิดเจลาติไนเซชันในช่วงอุณหภูมิที่ห่างกัน 8-10 °C เม็ดแป้งขนาดใหญ่จะเกิดเจลาติไนซ์ได้ก่อนขนาดเล็ก (Collison, 1968; Morrison และ Laignelet, 1983; Osman, 1967) แต่เมื่อใช้ SEM สังเกตโครงสร้างของเม็ดแป้งข้าวบาร์เลย์ ซึ่งมีเม็ดแป้งขนาดเล็กอยู่ประมาณ 30% พบว่าการสูญเสียเครื่องหมายกากบาทจะเกิดขึ้นได้พร้อม ๆ กัน (Goering และคณะ, 1974) การมีโมเลกุลอะไมโลสมากหรือน้อยในแป้งไม่มีผลต่ออุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว โดยแป้งทั้งสองชนิดนี้จะมีช่วงของอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนซ์ใกล้เคียงกัน (Halick และคณะ, 1960; Halick และ Kelly, 1959) ข้าวโพดและข้าวก็เช่นเดียวกัน (Schoch และ Maywald, 1956) แต่แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงมากๆ เช่นแป้ง amylo maize ให้ผลที่แตกต่างออกไป เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลสในเม็ดแป้งจับกันได้ดีมาก (highly associated) จนทำให้สามารถต้านทานการเกิดเจลาติไนซ์ได้แม้กระทั่งในน้ำเดือด (Collison, 1968)

การตรวจสอบช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์ของแป้ง

วิธีที่ง่ายและแม่นยำคือวัดอุณหภูมิที่เม็ดแป้งสูญเสียเครื่องหมายกากบาทเมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบ Kofler (Kofler hot stage microscope) ซึ่งเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่มีระบบการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างน้ำแป้งบนแผ่นสไลด์อย่างต่อเนื่องในอัตรา 2 °C ต่อนาที เมื่อมองผ่านแสงโพลาไรซ์ พบว่าจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงที่เห็นคือ เม็ดแป้งประมาณ 2% เริ่มพองตัวและสูญเสียเครื่องหมายกากบาท ที่จุดนี้เป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดเจลาติไนเซชัน (initial stage of gelatinization) เมื่อเม็ดแป้งในตัวอย่างสูญเสียเครื่องหมายกากบาทไป 50% จะเรียกเป็นจุดกลางของเจลาติไนเซชัน (midpoint of gelatinization) และเมื่อเม็ดแป้งในตัวอย่างสูญเสียเครื่องหมายไปประมาณ 98% จะเรียกเป็นจุดสุดท้ายของเจลาติไนเซชัน (final stage of gelatinization หรือ completion point) (Schoch และ Maywald, 1956; Watson, 1964) ดังนั้นส่วนใหญ่มักแสดงช่วงอุณหภูมิเจลาติไนเซชันของแป้งเป็นตัวเลขชุด แต่ถ้าวัดเป็นอุณหภูมิเดียว มักเป็นจุดสุดท้ายของ

เจลาตินในเซชัน หรือที่เรียกกันว่า Birefringence end point temperature (BEPT) นอกจากการใช้การสังเกตการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง birefringence ภายใต้อุปกรณ์จุลทรรศน์แล้ว ยังสามารถตรวจสอบอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินด้วยเครื่องมือที่วัดและบันทึกปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการ เช่น เครื่อง differential scanning calorimeter (DSC) ใช้สำหรับติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีของวัสดุในรูปฟังก์ชันของปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ ปกติพอลิเมอร์ต่างๆ ในรูปผลึกและอสัณฐานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะได้เมื่อได้รับความร้อน แบ่งก็เช่นเดียวกันในสภาพที่มีน้ำน้อย เมื่อให้ความร้อนจะมีอุณหภูมิหลอมละลาย (T_m) ที่สูงมาก กล่าวคือในช่วงของ 160 ถึง 200 °C แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมากขึ้นอุณหภูมิของการหลอมละลายก็จะลดลง เมื่อปริมาณน้ำมีประมาณ 70 ส่วน ทำให้เกิดเจลาตินในเซชัน ช่วงของอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลง (onset temperature) และอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (peak temperature) ของความร้อน คือ ช่วงของเจลาตินในเซชันเฉยๆ นั้นเอง สำหรับการตรวจสอบการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งโดยใช้เครื่อง DSC ทำได้โดยการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างสารผสมแป้งกับน้ำในอัตรา 30/70 จนถึงอุณหภูมิที่คาดว่าเลยช่วงในการเกิดเจลาตินในเซชันจะได้ thermogram ซึ่งเป็นกราฟระหว่าง heat flow และอุณหภูมิ พลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาตินในเซชัน (ΔH , cal/g) ได้จากพื้นที่ใต้กราฟหารด้วยน้ำหนักแป้งตัวอย่างดังสมการ

$$M \times (\Delta H) = K \times A$$

เมื่อ M = มวลของตัวอย่าง

ΔH = ความร้อนทั้งหมดของปฏิกิริยา (cal/g)

K = calibration constant ของเครื่องมือ (cal/cal)

A = พื้นที่ใต้กราฟ (cal)

2.2.4 รีโทรเกรเดชัน

การคืนตัวของน้ำแป้งสุกเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำแป้งสุกซึ่งร้อน มีอุณหภูมิต่ำลง ขณะที่อุณหภูมิตกลงนั้น โมเลกุลอิสระของอะไมโลสซึ่งอยู่ใกล้กันจะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กัน และจับตัวกันด้วยพันธะไฮโดรเจนทำให้เกิดสภาพการจัดเรียงตัวของโมเลกุลขึ้นใหม่ โดยเปลี่ยนจากลักษณะการกระจายตัวของโมเลกุลในน้ำแป้งหรือการเป็น amorphous ในเมืคแป้งมาเป็นส่วนที่เป็น crystallite ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยใช้ X-ray diffraction (Collison, 1968) ถ้าน้ำแป้งสุกมีความเข้มข้นต่ำ การจัดเรียงตัวของโมเลกุลเหล่านี้จะทำให้เกิดลักษณะตะกอนขุ่นขาว แต่ถ้าน้ำแป้งสุกมีความเข้มข้นสูง เช่น แป้งข้าวโพดความเข้มข้น 7% โดยน้ำหนัก จำนวนโมเลกุลที่มาจัดเรียงตัวกันใหม่มีมากและระหว่างเคลื่อนที่เข้ามาจับกันจะสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นและในที่สุดเกิดลักษณะเจลที่อ่อนนุ่ม (Ott และ Hester, 1965; Swinkels, 1985)

การคืบตัวของน้ำแป้งโดยทั่วไปจะเกิดได้ดีเมื่อน้ำแป้งมีความเข้มข้นสูงและทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิต่ำ แป้งแต่ละชนิดมีอัตราการคืบตัวของน้ำแป้งแตกต่างกัน พบว่าแป้งจากรากพืช พืชหัวมีอัตราการคืบตัวช้ากว่าแป้งจากธัญพืช (Whistler และ Johnson, 1948) ทั้งนี้เป็นเพราะแป้งจากรากและหัว เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวมากและเร็ว และเมื่อดึงแตกง่าย ทำให้โมเลกุลแป้งทั้งหมดกระจายอยู่ทั่วไปในน้ำแป้ง ยากที่โมเลกุลอะไมโลสจะมาจัดเรียงตัวกันได้อีกใหม่ แต่แป้งจากธัญพืช เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวน้อยกว่า เมื่อดึงแตกน้อย โมเลกุลที่คลายตัวยังอยู่ใกล้ชิดกันจึงเคลื่อนที่จับกันใหม่ได้ง่าย ซึ่งอาจจับตัวกันระหว่างเม็ดแป้งที่พองตัวซึ่งอยู่ใกล้กันหรือระหว่างชิ้นส่วนของเม็ดแป้งหรือโมเลกุลอะไมโลสอิสระที่หลุดออกมา ทำให้เกิดสภาพเป็น matrix ซึ่งยึดอยู่ด้วยกันด้วยพันธะไฮโดรเจนและสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ การมีอะไมโลเพคตินอยู่ด้วยทำให้อัตราการคืบตัวของน้ำแป้งช้าลง เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลเพคตินมีกิ่งก้านสาขาทำให้เกาะกักน้ำที่โมเลกุลจะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันใหม่ได้ จึงพบว่าแป้งประเภท waxy มีอัตราการคืบตัวของน้ำแป้งช้ากว่าแป้งชนิดอื่น (Osman, 1967) ขนาดโมเลกุลของอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดมีผลในการเกิดการคืบตัวของน้ำแป้งอีกด้วย โมเลกุลอะไมโลส ที่มีขนาดพอเหมาะในการเคลื่อนที่มาจับกัน คือ ในช่วง 100-200 หน่วยกลูโคส ถ้าโมเลกุลใหญ่ เช่น แป้งมันฝรั่งมีอะไมโลสขนาดใหญ่ประมาณ 1,000-6,000 หน่วยกลูโคส (Whistler และ Johnson, 1948) จะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันได้ยาก และถ้าโมเลกุลสั้นเกินไปจะเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา (Brownian movement) ทำให้จับกันยากเช่นกัน

2.3 แป้งดัดแปร

2.3.1 แป้งเอสเทอร์

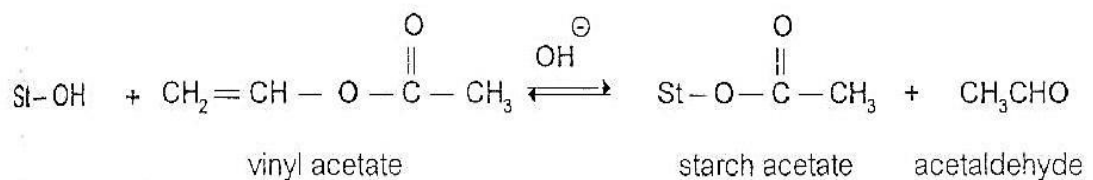
แป้งเอสเทอร์เป็นแป้งดัดแปรที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งกับหมู่ให้เอสเทอร์ของสารเคมีในสภาวะเบส โดยที่หมู่ให้เอสเทอร์จะเข้าแทนที่ภายในโมเลกุลของกลูโคสที่หมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 เช่น แป้งอะเซททิลเลต และแป้งออกทิลนิลซัคซินิเคแอนไฮไดรด์

แป้งอะเซททิลเลต

การดัดแปรแป้งโดยวิธีแอซิทิเคชัน เป็นการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลบนโมเลกุลของแป้งด้วยหมู่แอซิทิลจากสารเคมีที่ให้หมู่แอซิทิล ปฏิกิริยาการแทนที่เป็นแบบเอสเทอร์ฟิเคชัน แป้งดัดแปรที่ได้เรียกว่า แป้งแอซิเตต (starch acetate หรือ acetylated starch) (Jarowenko, 1986) แป้งแอซิเตตสามารถเตรียมได้โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งและกรดแอซิติก (acetic acid), แอซิติกแอนไฮไดรด์ (acetic anhydride), ไวนิลแอซิเตต (vinyl acetate), แอซิทิลคลอไรด์ (acetyl chloride), และ ไดคลิโตน

(diketone) (Ogawa และคณะ, 1999) ในอุตสาหกรรมอาหาร สามารถใช้สารเคมีได้ 2 ชนิด คือ แอซิติคแอนไฮไดรด์ โดยมีเกณฑ์กำหนดให้หมู่แอซิติลไม่เกินร้อยละ 2.5 และไวนิลแอซิเตต โดยอนุญาตให้ใช้ได้ไม่เกินร้อยละ 7.5 แป้งดัดแปรที่ได้ต้องมีความหนืดสูงกว่าแป้งดิบที่นำมาดัดแปร และรักษาความหนืดไว้ได้ดี มีลักษณะเจลลีสยิดเกาะเป็นเนื้อเดียวกันและมีลักษณะอ่อนตัว (cohesive flow) (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2535)

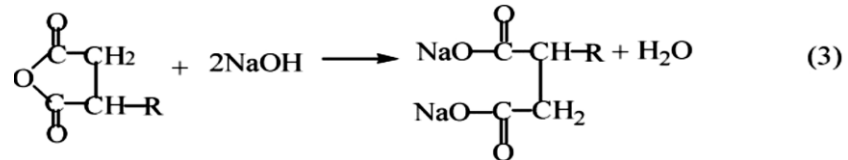
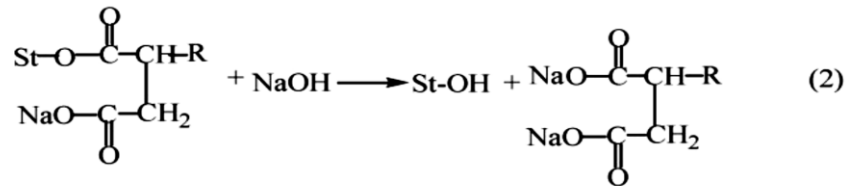
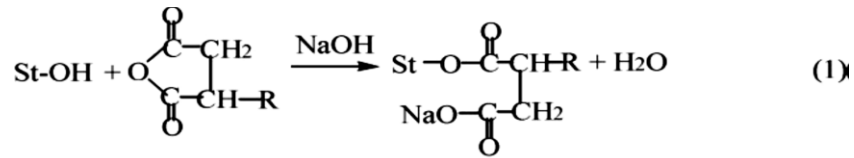
การผลิตแป้งอะเซททีเลตด้วยไวนิลแอซิเตต โดยปกติใช้วิธีการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแป้งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำกับไวนิลแอซิเตตที่อุณหภูมิห้องและใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Phillips และคณะ, 1999) แอซิทลไฮโดรเจนซึ่งเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยานี้สามารถกำจัดออกได้โดยการล้างน้ำ แต่แอซิทลไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยานี้ จะเกิดเป็นครั่งหนึ่งโดยน้ำหนักของไวนิลแอซิเตตที่ใช้ ทำให้เกิดปัญหาสารเหลือทิ้ง (Radley, 1976) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างแป้งกับไวนิลแอซิเตตแสดงดังรูปที่ 2.7 ได้แป้งอะเซททีเลตที่มีความไม่ชอบน้ำมากขึ้น (Adebowale และคณะ, 2006)



รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาแอซิติลเลชันระหว่างแป้งกับไวนิลแอซิเตต (ที่มา : Sanders (1996))

แป้งออกทิลซัคซินิกแอนไฮไดรด์

แป้งออกทิลซัคซินเนตที่ใช้ในอาหารเป็นแป้งดัดแปรที่มีระดับการแทนที่ต่ำ มีวิธีการเตรียมโดยทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำกับสารออกทิลซัคซินิกแอนไฮไดรด์ (octenyl succinic anhydride; OSA) 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 แป้งดัดแปรที่ได้จะยังคงอยู่ในสภาพที่เป็นเม็ดและมีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำมากขึ้น (Young-Seon และคณะ, 1999) ดังสมการ(1) ในรูปที่ 2.8 NaOH จะทำหน้าที่ในการเพิ่ม nucleophilicity ของหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลแป้ง (OH เปลี่ยนเป็น O⁻) และช่วยเพิ่มการพองตัวของเม็ดแป้งซึ่งจะทำให้ OSA เข้าถึงโมเลกุลแป้งได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตาม NaOH ก็อาจก่อให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงดังสมการ (2) และ (3) ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาลดลงได้



รูปที่ 2.8 การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างแป้งกับ OSA

ที่มา: Song และคณะ (2006)

2.3.2 แป้งที่ผ่านการย่อยด้วยกรดหรือเอนไซม์

การย่อยแป้งด้วยกรด เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับกรดเกลือหรือกรดกำมะถันเจือจาง กรดจะตัดโมเลกุลของแป้งทำให้ขนาดโมเลกุลเล็กลงจนได้ความหนืดที่ต้องการ ได้ผลิตภัณฑ์แป้งย่อยด้วยกรด (acid-modified starch) แป้งที่ถูกลดขนาดโมเลกุลด้วยกรดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแป้งย่อยด้วยกรดซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดแป้ง การให้ความร้อนแก่แป้งย่อยด้วยกรด ทำให้เม็ดแป้งแตกออกและเมื่อเย็นลงเกิดการคืนตัวได้เป็นเจลแข็งทึบแสง สามารถยึดเกาะกันได้ดี (Wurzburg, 1986)

การตัดกิ่งแป้งด้วยเอนไซม์ โดยทั่วไปใช้เอนไซม์ไอโซอะไมเลส (isoamylase) หรือเอนไซม์ พูลูลานาส (pullulanase) ผสมกับสารละลายแป้งบ่มไว้ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม เมื่อเอนไซม์ย่อยถึงระดับที่ต้องการ หยุดปฏิกิริยาเอนไซม์โดยเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น โดยเอนไซม์จะย่อยโมเลกุลแป้งที่พันธะกิ่งหรือพันธะ α -1,6 ของอะไมโลเพคติน ทำให้ได้ส่วนที่เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นเพิ่มขึ้น (Manners และ Matheson, 1981; Yokobayashi และคณะ, 1973) ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของแป้งตัดกิ่งได้แก่ ปริมาณของอะไมโลสและการกระจายตัวน้ำหนักโมเลกุลของแป้งเริ่มต้น (amylose content และ MW distribution) ระดับการตัดกิ่ง (degree of debranching) ชนิดของเอนไซม์ตัดกิ่งที่ใช้ และสภาวะที่ใช้ในการตกผลึก เช่น ปริมาณของแข็ง อุณหภูมิ เวลา ชนิดและความหนาแน่นของการผสม

2.3.3 สารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของแป้งกับกรดไขมัน

สารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของแป้งกับกรดไขมันเกิดจากการให้ความร้อนแก่ของผสมของแป้งกับกรดไขมันเพื่อทำลายโครงสร้างภายในเม็ดแป้งทำให้โมเลกุลของแป้งกระจายตัว จากนั้นทำให้เย็นลงภายใต้สภาวะที่ควบคุม กรดไขมันจะเหนี่ยวนำโมเลกุลอะไมโลสให้อยู่ในสภาพสารประกอบเชิงซ้อน โดยที่โมเลกุลของอะไมโลสจะบิดหมุนเกลียวเรียกว่า วี-อะไมโลส (V-amylose) พันล้อมรอบกรดไขมัน และหันด้านปลายที่มีขั้วออกทางด้านนอกของสายเกลียว และจับส่วนที่ไม่มีขั้วของกรดไขมันไว้ในช่องว่าง เกิดแรงกระทำระหว่างสารที่ไม่ชอบน้ำกับส่วนที่ไม่ชอบน้ำภายในช่องว่างของอะไมโลส โดยทั่วไปการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน V-amylose จะเกิดจากเกลียวอะไมโลสที่ประกอบไปด้วยกลูโคส 6 หน่วยต่อรอบกับลิแกนด์ ซึ่งสามารถจำแนกชนิดของ V-amylose ได้ตามขนาดของเกลียวอะไมโลสได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ชนิดของ V-amylose ขนาดของยูนิตเซลล์และชนิดของลิแกนด์

ชื่อเรียก	ที่อยู่ของลิแกนด์	ชนิดของลิแกนด์	ขนาดของยูนิตเซลล์		
			<i>a</i> (nm)	<i>b</i> (nm)	<i>c</i> (nm)
V _h ¹ หรือ V _{6I}	อยู่ในช่องว่างของเกลียว	linear alcohol, fatty acid, aldehyde, emulsifier	1.36-1.37	2.37-2.58	0.78-0.81
V _a ²	อยู่ในช่องว่างของเกลียว		1.30-1.32	2.25-2.70	0.79
V _{butanol} ³ หรือ V _{6II}	อยู่ในช่องว่างของเกลียว และ ตรง ส่วน ที่ ว่ าง ระหว่างเกลียวอะไมโลส	butanol, acetone, branched alcohol, thymol, linalool, menthone	2.74	2.65	0.80
V _{isopropanol} ⁴ หรือ V _{6III}	อยู่ในช่องว่างของเกลียว และตรงส่วนที่ว่าง ระหว่างเกลียวอะไมโลส	Isopropanol	2.82	2.93	0.80

ที่มา : ดัดแปลงจาก Putseys และคณะ (2010)

¹Hinkle และ Zobel (1968), Rappenecker และ Zugenmaier (1981), Takeo และ Kuge (1971), Zobel และคณะ (1967)

²Hinkle และ Zobel (1968), Zobel และคณะ (1967)

³Helbert และ Chanzy (1994)

⁴Buleon และคณะ (1990)

V_h หรือ V_{6I} เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดจากการรวมตัวของเกลียวอะไมโลสกับกรดไขมันอิ่มตัวหรือแอลกอฮอล์สายตรง (Germino และ Valletta, 1964; Sarko และ Biloski, 1980; Valletta และคณะ, 1964; Yamashita และคณะ, 1973; Zobel และคณะ, 1967) ซึ่งเมื่อกำจัดน้ำออกจะทำให้ได้สารประกอบเชิงซ้อนชนิด V_a ที่มีขนาดยูนิตเซลล์เล็กลง (Hinkle และ Zobel, 1968; Zobel และคณะ, 1967) สำหรับสารประกอบเชิงซ้อนชนิด $V_{butanol}$ หรือ V_{6II} เกิดจากการรวมตัวของเกลียวอะไมโลสกับแอลกอฮอล์สายสั้น โดยแทรกอยู่ทั้งในช่องว่างของเกลียวและระหว่างเกลียวของอะไมโลส ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนชนิดนี้จะมีขนาดยูนิตเซลล์ใหญ่กว่าชนิด V_h หรือ V_{6I} (Helbert และ Chanzy, 1994) ในขณะที่สารประกอบเชิงซ้อนชนิด $V_{isopropanol}$ หรือ V_{6III} เกิดจากการรวมตัวของเกลียวอะไมโลสกับไอโซโพรพานอลที่แทรกอยู่ทั้งในช่องว่างของเกลียวและระหว่างเกลียวของอะไมโลส เช่นเดียวกับสารประกอบเชิงซ้อนชนิด $V_{butanol}$ หรือ V_{6II} แต่สารประกอบเชิงซ้อนชนิด $V_{isopropanol}$ หรือ V_{6III} จะมีพื้นที่ช่องว่างมากกว่า (Buleon และคณะ, 1990) นอกจากนี้ยังพบว่าสารประกอบเชิงซ้อนชนิด $V_{butanol}$ หรือ V_{6II} และ $V_{isopropanol}$ หรือ V_{6III} สามารถเปลี่ยนเป็นชนิด V_h หรือ V_{6I} ได้เมื่อกำจัดน้ำออก (Helbert และ Chanzy, 1994)

เกลียวอะไมโลสมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อรวมตัวกับลิแกนด์ขนาดใหญ่เช่น เมนโธน (menthone) หรือ เฟนโคน (fenchone) ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนชนิด V_7 โดยที่เกลียวอะไมโลสจะประกอบไปด้วยกลูโคส 7 หน่วยต่อรอบ ในขณะที่การรวมตัวกับ naphthol จะทำให้ได้สารประกอบเชิงซ้อนชนิด V_8 โดยที่เกลียวอะไมโลสจะประกอบไปด้วยกลูโคส 8 หน่วยต่อรอบ

โดยทั่วไปการจัดเรียงตัวของโครงสร้างสารประกอบเชิงซ้อน V-amylose สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ 1) Type I complexes เป็นการจัดเรียงตัวของ V-amylose แบบไม่เป็นระเบียบ ซึ่งเกิดจากการลดอุณหภูมิหลังการเจลาติไนเซชันของแป้งลงอย่างรวดเร็ว และ 2) Type II complexes เป็นการจัดเรียงตัวโครงสร้างผลึกของ V-amylose แบบเป็นระเบียบ ซึ่งเกิดจากการลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ (ธีรารัตน์ อธิธิโสภณกุล, 2555) สำหรับการศึกษาคุณสมบัติการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของแป้งกับกรดไขมัน พบว่า pattern ของสารประกอบเชิงซ้อนชนิด V_6 -amylose มี peak เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 7.5, 12.9, 19.8 และ 22.3 (2 θ) (Mikus และคณะ, 1946; Zobel, 1988; Zobel และคณะ, 1967) ในขณะที่ pattern ของสารประกอบเชิงซ้อนชนิด V_7 -amylose มี peak เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 6.8, 11.7, 12.9, 18 และ 20 (2 θ) (Takeo และคณะ, 1973; Yamashita และคณะ, 1973; Yamashita และ Hirai, 1966)

การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของแป้งกับกรดไขมัน มีรายงานว่าความยาวของสายโพลีเมอร์ (degree of polymerization ; DP) อะไมโลสที่สั้นหรือยาวเกินไป ไม่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันกับกรดไขมันได้ (Gelders และคณะ, 2004) ซึ่ง Godet และคณะ (1995a) พบว่าอะไมโลสที่มี DP น้อยกว่าหรือเท่ากับ 20 สั้นเกินไปไม่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับกรดไขมันได้ และยังพบว่าอะไมโลสที่มี DP เท่ากับ 60 ไม่สามารถเกิดการจัดเรียงตัวเป็น

สารประกอบเชิงซ้อนชนิด Type II complexes ได้ (Gelders และคณะ, 2004) ชีรารัตน์ อธิธิโสภณกุล (2555) รายงานว่าความยาวของสายอะไมโลสที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับขนาดของโมเลกุลของลิแกนด์ เช่น กรดปาล์มมิติก (palmitic acid; C16) ควรใช้อะไมโลสที่มีจำนวนกลูโคส 30-40 โมเลกุล ในขณะที่ กรดลอริก (lauric acid; C12) อะไมโลสควรมีจำนวนกลูโคส 20-30 โมเลกุล

นอกจากนี้ยังพบว่าความยาวของกรดไขมันมีผลต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน โดยที่กรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนน้อยกว่า 10 อะตอมไม่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนแบบ อินคลูชันได้ (Godet และคณะ, 1995b; Karkalas และ Raphaelides, 1986; Lebail และคณะ, 2000; Tufvesson และคณะ, 2003) Karkalas และ Raphaelides (1986) รายงานว่ากรดไขมันสายสั้นไม่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้ เนื่องจากมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) น้อย ทำให้ไม่มีแรงผลักดันเพียงพอเพื่อแยกตัวออกจากส่วนน้ำ ในขณะที่กรดไขมันสายยาวนั้นมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) มากกว่า ทำให้มีแรงผลักดันเพียงพอให้สามารถแยกตัวออกจากส่วนน้ำและเข้าไปอยู่ในโพรงของเกลียวอะไมโลส (Fanta และคณะ, 1999; Putseys และคณะ, 2009) อย่างไรก็ตามมีรายงานว่ากรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอน 14 อะตอม สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้ดีที่สุด (Bhatnagar และ Hanna, 1994; Hoover และ Hadziyev, 1981; Krog, 1971) ขณะที่ Krog (1971) และ Lagendijk และ Pennings (1970) รายงานว่าความยาวของกรดไขมันที่เหมาะสม คือ มีจำนวนคาร์บอน 16 หรือ 18 อะตอม

2.4 สตาร์ช ไมโครพาร์ติเคิล (starch microparticles)

ในปัจจุบันมีการใช้แป้งเป็นวัตถุดิบในการผลิตไมโครพาร์ติเคิลอย่างกว้างขวาง ซึ่งไมโครพาร์ติเคิลที่ผลิตจากแป้งนั้นจะเรียกว่า “สตาร์ช ไมโครพาร์ติเคิล (starch microparticles)” สตาร์ช ไมโครพาร์ติเคิลเป็นอนุภาคที่มีขนาดระหว่าง 1 ถึง 1,000 μm นิยมนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารหรือทางการแพทย์เพื่อใช้กับยาที่มีค่าการละลายต่ำ เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็ก พื้นที่ผิวมาก ช่วยเพิ่มอัตราเร็วในการละลายส่งผลให้ดูดซึมได้ดีขึ้น สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติและไม่เป็นพิษ โดยทั่วไปสตาร์ช ไมโครพาร์ติเคิล สามารถจำแนกได้เป็น สตาร์ช ไมโครสเฟียร์ และสตาร์ช สเฟียร์ไรต์ ขึ้นอยู่กับขั้นตอนในการเตรียม สตาร์ช ไมโครสเฟียร์เป็นอนุภาคทรงกลม ที่มีทั้งลักษณะพื้นผิวไม่เป็นระเบียบและพื้นผิวเรียบ ภายในประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบและมีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็ก สตาร์ช ไมโครสเฟียร์เกิดจากการทำลายโครงสร้างภายในของเม็ดแป้งด้วยด่าง จากนั้นทำให้โมเลกุลของแป้งที่กระจายตัวกลับมาจัดเรียงตัวใหม่ด้วยเทคนิคอิมัลชันหรือร่วมกับการทำโครสลิงเพื่อเสริมความแข็งแรง มีรายงานว่าเตรียมไมโครสเฟียร์จากแป้งด้วยเทคนิคอิมัลชันสามารถทำได้ 2 แบบ คือ 1) ใช้ระบบอิมัลชันของน้ำในน้ำมัน (water-in-oil emulsion) โดยที่โมเลกุลของแป้งเป็นส่วนที่กระจายตัว (internal or dispersed phase) แทรกอยู่ใน

ของเหลวที่เป็นสารอินทรีย์ที่ไม่ชอบน้ำเป็นส่วนที่ต่อเนื่อง (external or continuous phase) เช่น พาราฟินเหลวผสมกับ span80 และ tween80 โทลูอินกับคลอโรฟอร์ม น้ำมันพืช เป็นต้น (Artursson และคณะ, 1984; Fang และคณะ, 2008; Laakso และคณะ, 1986; Li และคณะ, 2012; Rydell และคณะ, 2005; Stureson และ Wikingsson, 2000) 2) ใช้ระบบอิมัลชันของน้ำในน้ำ (water-in-water emulsion) โดยใช้ของเหลวที่ชอบน้ำเป็นส่วนที่ต่อเนื่อง (external or continuous phase) เช่น โพลีโพรพิลีนไกลคอล โพลีเอทิลีนไกลคอล เป็นต้น (Elfstrand และคณะ, 2009; Li และคณะ, 2012; Li และคณะ, 2009a; Li และคณะ, 2009b; Seki และคณะ, 2007) นอกจากนี้ยังพบว่ามีการใช้เทคนิคอิมัลชันร่วมกับการทำครอสลิงก์กับสารทำปฏิกิริยา เช่น โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต ไตรโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต อีพิกโลโรไฮดริน เป็นต้น (Elfstrand และคณะ, 2006; Elfstrand และคณะ, 2009; Fang และคณะ, 2008; Hamdi และคณะ, 2001; Li และคณะ, 2012; Li และคณะ, 2009a; Li และคณะ, 2009b; Lindberg และคณะ, 1984)

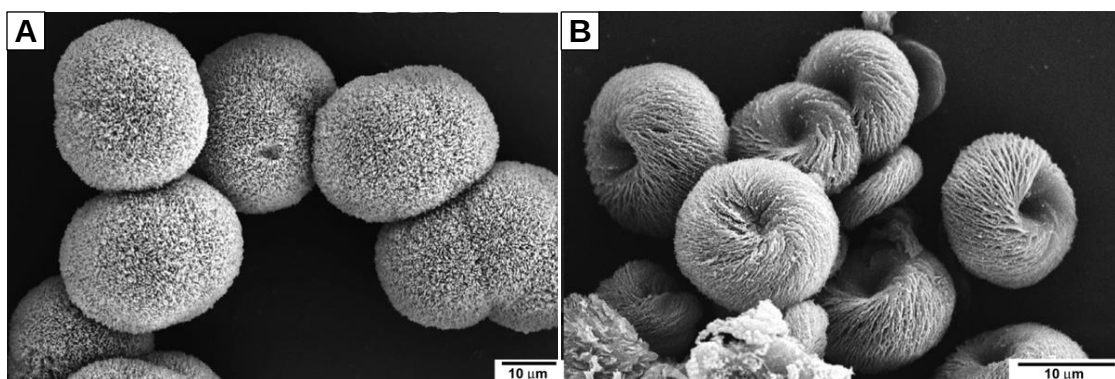
สตาร์ช ไมโครสเฟียร์มีคุณสมบัติทนความร้อนสูง ทนต่อการกด พองตัวได้ดีและสามารถย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส ปัจจุบันมีการศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ไมโครสเฟียร์ในทางการแพทย์มากมาย เช่น ใช้เป็นตัวนำส่งยาสำหรับรักษาทางโพรงจมูก (Bjork และ Edman, 1988, 1990; Pereswetoff-Morath, 1998) นำส่งยาชนิดต่างๆ (Fang และคณะ, 2008; Li และคณะ, 2009b; Shirui และคณะ, 2012; Surini และคณะ, 2009) นำส่งโปรตีนและเปปไทด์ (Elfstrand และคณะ, 2007; Pareta และ Edirisinghe, 2006) ควบคุมโลหะหนัก (Sancey และคณะ, 2011; Yang และคณะ, 2010) และกักเก็บน้ำมันจากพืช (Glenn และคณะ, 2010)

2.5 สตาร์ช สเฟียร์ูไลต์ (starch spherulite)

2.5.1 การผลิตสตาร์ช สเฟียร์ูไลต์

สเฟียร์ูไลต์เป็นอนุภาคที่มีรูปทรงสมมาตรในแนวรัศมี (radially symmetric) ภายในประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวแบบกึ่งผลึก (semicrystalline structure) มีสมบัติ birefringence (ค่า radial และ tangential refractive index แตกต่างกัน) เมื่อดูผ่าน crossed polarizer จะแสดงลักษณะ “Maltese cross” โดยทั่วไปสเฟียร์ูไลต์เตรียมได้จากพอลิเมอร์หลอมเหลวแล้วทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว (rapid quenching) (Nordmark และ Ziegler, 2002a) สเฟียร์ูไลต์สามารถเตรียมได้จากทั้งพอลิเมอร์สังเคราะห์และพอลิเมอร์จากธรรมชาติ เช่น คอลลาเจน (Martin และคณะ, 2003), เซลลูโลส (Kobayashi และคณะ, 2000), เบต้า-แลคโตโกลบูลิน (Bromley และคณะ, 2005), silk fibroin (Tanaka และคณะ, 2001), ไข่ขาว (Murray และ Neville, 1997, 1998; Sakamoto และคณะ, 2000), เคซีน (Barham และคณะ, 1974), ไคโตแซน (Murray และ Neville, 1998), อะไมโลสจาก

แป้งมันฝรั่ง (Creek และคณะ, 2007), อะไมโลสจากแป้งข้าวโพด (Creek และคณะ, 2007; Creek และคณะ, 2006) และแป้งชนิดต่างๆ (Fanta และคณะ, 2002; Fanta และคณะ, 2005; Fanta และคณะ, 2006; Nordmark และ Ziegler, 2002a, 2002b; Peterson และคณะ, 2005; Shogren และคณะ, 2006; Ziegler และคณะ, 2005; Ziegler และคณะ, 2003) เป็นต้น จากรายงานก่อนหน้านี้พบว่าสเฟียรูไลต์มี 2 ลักษณะ คือ สเฟียรูไลต์ที่มีลักษณะเป็น sphere ซึ่งได้จากการเตรียมจากสารละลายแป้ง (Creek, 2007; Creek และคณะ, 2006; Nordmark และ Ziegler, 2002a, 2002b; Suwanayuen, 2009; Ziegler และคณะ, 2005; Ziegler และคณะ, 2003) สเฟียรูไลต์ที่มีลักษณะเป็น torus ขนาดเล็ก และ sphere หรือ lobe ขนาดใหญ่ ที่ได้จากการชักนำให้เกิดโดยสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสและกรดไขมัน (Bhosale และ Ziegler, 2010; Byars และคณะ, 2003, 2006; Fanta และคณะ, 2002; Fanta และคณะ, 2005; Fanta และคณะ, 2006; Peterson และคณะ, 2005; Shogren และคณะ, 2006)



รูปที่ 2.9 ลักษณะของสเฟียรูไลต์ (A) sphere หรือ lobe (B) torus หรือ disc
ที่มา: Fanta และคณะ (2002)

สำหรับการเตรียมสเฟียรูไลต์จากแป้งมีรายงานว่าทำได้ 2 แบบ คือ สเฟียรูไลต์ที่ชักนำให้เกิดโดยสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสและกรดไขมัน โดยให้ความร้อนกับของผสมของสารละลายแป้ง (starch dispersion) กับกรดไขมันที่อุณหภูมิ 140 °C และทำให้เย็นลงอย่างช้าๆ (Fanta และคณะ, 2002; Fanta และคณะ, 2005; Fanta และคณะ, 2006; Peterson และคณะ, 2005; Shogren และคณะ, 2006) อีกแบบหนึ่งคือ การชักนำให้เกิดโดยให้ความร้อนกับสารละลายแป้งที่อุณหภูมิมากกว่า 170 °C และทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว (Nordmark และ Ziegler, 2002a, 2002b; Ziegler และคณะ, 2005; Ziegler และคณะ, 2003) สมบัติของสเฟียรูไลต์ (เช่น ขนาดและรูปร่าง ความเป็นผลึกและชนิดของผลึก จุดหลอมเหลว) ที่ได้จะขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีของแป้ง ปริมาณและโครงสร้างของอะไมโลส ความเข้มข้นของแป้งที่ใช้ ชนิดของกรดไขมัน สภาวะความเป็นกรดค่า อุณหภูมิในการทำให้แป้งกระจายตัวและสภาวะในการทำใหเย็นตัวลง (cooling rate) (Conde-Petit และคณะ, 2006)

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตสเฟียรูไลต์

ปริมาณและโครงสร้างของอะไมโลส

การเตรียมสเฟียรูไลต์จากแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสและพอลิเมอร์เชิงเส้นสูงจะได้สเฟียรูไลต์ในปริมาณมากและมีลักษณะกลม (Lay Ma และคณะ, 2011; Nordmark และ Ziegler, 2002a) และการใช้กรดในการตัดกิ่งของอะไมโลเพคตินจะได้ส่วนที่เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นมากขึ้น ทำให้เกิดสเฟียรูไลต์ได้ดีขึ้น (Ziegler และคณะ, 2003) ในขณะที่แป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินมากพบว่าไม่สามารถเกิดสเฟียรูไลต์ได้ (Creek และคณะ, 2006; Nordmark และ Ziegler, 2002a)

ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้ง

Ziegler และคณะ (2003) พบว่าการเตรียมสเฟียรูไลต์จากแป้งถั่วเขียว แป้งมันฝรั่ง และแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดสเฟียรูไลต์ได้ดี ในขณะที่แป้งข้าวโพดเกิดสเฟียรูไลต์ได้น้อยและแป้งสาลี แป้งมันสำปะหลัง และแป้งสาкупพบสเฟียรูไลต์เกิดขึ้นน้อยมาก สำหรับแป้งข้าวโอ๊ต แป้งข้าว แป้งข้าวฟ่าง แป้ง amaranth และแป้ง yellow pea ไม่สามารถเกิดสเฟียรูไลต์ได้ ซึ่งผู้วิจัยให้ความเห็นว่าการเกิดสเฟียรูไลต์เกี่ยวข้องกับลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้ง โดยเสนอว่าแป้งที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ B หรือ C จะเกิดสเฟียรูไลต์ได้ดีกว่าแป้งที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A นอกจากนี้แป้งที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีโครงสร้างที่เป็นกิ่งก้านจะทำให้ได้สเฟียรูไลต์ที่มีขนาดเล็ก

ความเข้มข้นของแป้งที่ใช้

ความเข้มข้นของแป้งที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดเจลและลดการเกิดสเฟียรูไลต์ (Creek, 2007) ซึ่งความเข้มข้นของแป้งที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับแป้งแต่ละชนิด เช่น แป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสสูงที่ความเข้มข้น 5% (w/w) จะมีการกระจายตัวของอนุภาคและเกิดสเฟียรูไลต์ได้ดี (Nordmark และ Ziegler, 2002a) ในขณะที่แป้งมันฝรั่งที่ความเข้มข้นเดียวกันไม่สามารถเกิดสเฟียรูไลต์ได้ โดยทั่วไปสเฟียรูไลต์จะเกิดได้ดีที่ความเข้มข้นแป้งในช่วง 10 ถึง 20% (w/w) ซึ่งจะได้สเฟียรูไลต์ที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ B หรือ C (Ziegler และคณะ, 2003)

การรวมตัวของอะไมโลสกับกรดไขมัน (amylose-lipid inclusion complexes)

จากงานวิจัยของ Fanta และคณะ (2002) พบว่าการเตรียมสเฟียรูไลต์จากแป้งข้าวโพด แป้งข้าวโพดข้าวเหนียว แป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสสูง แป้งข้าว แป้งมันฝรั่ง และแป้งสาลี ได้

ปริมาณสเฟียรูไลต์ 7-12% ของปริมาณแป้งทั้งหมด เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Fanta และคณะ (2005) ที่เตรียมจากแป้งข้าวโพดพบว่า มีสเฟียรูไลต์เกิดขึ้นปริมาณ 4-10% ของปริมาณแป้งทั้งหมด ต่อมา Fanta และคณะ (2008) ศึกษาการเตรียมสเฟียรูไลต์จากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสสูงกับกรดปาล์มมิก พบว่าได้ปริมาณสเฟียรูไลต์สูงถึง 60% ของปริมาณแป้งทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าการใช้แป้งที่อยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนกับกรดไขมันในการเตรียมจะช่วยชักนำให้เกิดสเฟียรูไลต์ได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่าผลึกของสเฟียรูไลต์ที่ได้มีลักษณะแบบ 6_1V หรือ 7_1V แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของกรดไขมันที่ใช้ซึ่งมีผลต่อรูปแบบการเกิดเกลียวอะไมโลส (amylose helix)

อุณหภูมิในการทำให้แป้งกระจายตัว

มีรายงานว่าที่อุณหภูมิ 170 °C คืออุณหภูมิต่ำสุดในการทำให้แป้งกระจายตัว ซึ่งเหมาะกับการเกิดสเฟียรูไลต์ (Ziegler และคณะ, 2003) โดยให้เหตุผลว่าที่อุณหภูมิสูงโครงสร้างที่เป็นกึ่งก้านจะลดลงและทำให้มีโมเลกุลเส้นตรงสายสั้นเพิ่มขึ้นและมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น (chain flexibility) ช่วยให้การรวมตัวเกิดสเฟียรูไลต์ได้ดี (Nordmark และ Ziegler, 2002b) ซึ่ง Vesterinen และคณะ (2001) เสนอว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 150 °C ทำให้เม็ดแป้งเกิดการกระจายตัวอย่างสมบูรณ์

อัตราการทำให้เย็น (cooling rate)

การทำให้เย็นด้วยอัตราเร็วต่างๆ มีผลต่อการเกิดสเฟียรูไลต์และรูปร่างลักษณะที่ได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 Nordmark และ Ziegler (2002a) พบว่าการเตรียมสเฟียรูไลต์จากแป้งข้าวโพดโดยการทำให้เย็นอย่างช้าด้วยอัตรา 0.1-1 °C ต่อนาที ทำให้ได้สเฟียรูไลต์ที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอ การเตรียมสเฟียรูไลต์จากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับกรดปาล์มมิก โดยการลดอุณหภูมิลงจาก 180 °C ถึง 90 °C ด้วยอัตรา 1 °C ต่อนาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงถึง 40 °C ด้วยอัตรา 1 °C ต่อนาที พบว่ามีสเฟียรูไลต์ลักษณะกลมขนาดใหญ่เกิดขึ้น (15-25 μm) จำนวนมาก ในขณะที่การลดอุณหภูมิลงจาก 140 °C ถึง 90 °C ด้วยอัตรา 50 °C ต่อนาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงถึง 40 °C ด้วยอัตรา 1 °C ต่อนาที พบว่ามีสเฟียรูไลต์เกิดขึ้นน้อยและมีลักษณะเป็น torus ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นเจล (Bhosale และ Ziegler, 2010) นอกจากนี้ยังพบว่าการเตรียมสเฟียรูไลต์จากแป้งข้าวโพดด้วยการทำให้เย็นอย่างช้าโดยเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องจนครบเวลา 22 ชั่วโมง ทำให้ได้สเฟียรูไลต์ที่มีทั้งลักษณะกลมและเป็น torus มีสมบัติ birefringence แสดงลักษณะ “Maltese cross” (Fanta และคณะ, 2002; Fanta และคณะ, 2005) สำหรับการทำให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ มีผลต่อการเกิดสเฟียรูไลต์ที่ชักนำให้เกิดโดยสารประกอบเชิงซ้อนของแป้งและกรดไขมัน ในขณะที่เมื่อไม่มีการชักนำให้เกิดโดยสารประกอบเชิงซ้อนของแป้งและกรดไขมันจะไม่พบสเฟียรูไลต์เกิดขึ้นจากการทำให้เย็นในสถานะเดียวกัน (ต่ำกว่า 1 °C ต่อนาที)

ตารางที่ 2.3 ผลของอัตราการทำให้เย็นต่อการเกิดสเฟียรูไลต์ที่เตรียมได้จากวัตถุดิบต่างๆ

อัตราการทำให้เย็นตัว (cooling rate)	วัตถุดิบ	ลักษณะของสเฟียรูไลต์
0.1-1 °C ต่อนาที	Hylon VII (Nordmark และ Ziegler, 2002a)	- มีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ สังเกตได้ยาก - มีลักษณะเป็นแท่ง หรือ กลุ่มก้อนที่รวมตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ และไม่แสดงลักษณะ “Maltese cross”
1-2.5 °C ต่อนาที	แป้งถั่วเขียว (Ziegler และคณะ, 2005)	- มีสเฟียรูไลต์เกิดขึ้น - มีส่วนที่ไม่ใช่สเฟียรูไลต์ “salt and pepper” เพิ่มขึ้น - มีสมบัติ birefringence ต่ำ
5-10 °C ต่อนาที	แป้งถั่วเขียว (Ziegler และคณะ, 2005)	- มีสเฟียรูไลต์เกิดขึ้น - มีลักษณะเป็น branched crystalline
ทำให้เย็นอย่างรวดเร็ว โดยใช้ไนโตรเจนเหลว	แป้งถั่วเขียว (Ziegler และคณะ, 2005) แป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสสูง (Nordmark และ Ziegler, 2002a)	- มีสเฟียรูไลต์เกิดขึ้นน้อยมาก - ได้อนุภาคที่เป็น amorphous - มีสเฟียรูไลต์เกิดขึ้นน้อยมาก - มีสมบัติ birefringence ลักษณะ sheets หรือ lamellae
ลดอุณหภูมิลงจาก 180 °C ถึง 90 °C ด้วยอัตรา 1 °C ต่อนาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงถึง 40 °C ด้วยอัตรา 1 °C ต่อนาที	สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับกรดปาล์มมิก (Bhosale และ Ziegler, 2010)	- มีสเฟียรูไลต์ขนาดใหญ่เกิดขึ้น (15-25 μm) จำนวนมาก - มีลักษณะกลม

ตารางที่ 2.3 ผลของอัตราการทำให้เย็นต่อการเกิดสเฟียรูไลต์ที่เตรียมได้จากวัตถุดิบต่างๆ (ต่อ)

อัตราการทำให้เย็นตัว (cooling rate)	วัตถุดิบ	ลักษณะของสเฟียรูไลต์
ลดอุณหภูมิลงจาก 180 °C ถึง 70 °C ด้วยอัตรา 1 °C ต่อนาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงถึง 10 °C ด้วยอัตรา 0.04 °C ต่อนาที	สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับกรดปาล์มมิติก (Bhosale และ Ziegler, 2010)	- มีสเฟียรูไลต์ที่มีรอยแตกขนาดใหญ่เกิดขึ้น
ลดอุณหภูมิลงจาก 180 °C ถึง 70 °C ด้วยอัตรา 50 °C ต่อนาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงถึง 40 °C ด้วยอัตรา 1 °C ต่อนาที	สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับกรดปาล์มมิติก (Bhosale และ Ziegler, 2010)	- มีสเฟียรูไลต์เกิดขึ้น - มีลักษณะกลม พื้นผิวไม่เรียบ
ลดอุณหภูมิลงจาก 180 °C ถึง 90 °C ด้วยอัตรา 50 °C ต่อนาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงถึง 10 °C ด้วยอัตรา 1 °C ต่อนาที	สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับกรดปาล์มมิติก (Bhosale และ Ziegler, 2010)	- มีสเฟียรูไลต์เกิดขึ้น - มีลักษณะกลม พื้นผิวไม่เรียบ
ลดอุณหภูมิลงจาก 140 °C ถึง 90 °C ด้วยอัตรา 1 °C ต่อนาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงถึง 10 °C ด้วยอัตรา 0.04 °C ต่อนาที	สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับกรดปาล์มมิติก (Bhosale และ Ziegler, 2010)	- มีสเฟียรูไลต์เกิดขึ้น - มีลักษณะเป็น torus
ลดอุณหภูมิลงจาก 95 °C ถึง 25 °C ภายในเวลา 4 ชั่วโมง (ประมาณ 0.3 °C ต่อนาที)	แป้งข้าวโพด (Fanta และคณะ, 2005) ของผสมของแป้งข้าวโพดกับน้ำมันมิเนอรัล (Fanta และคณะ, 2005)	- มีสเฟียรูไลต์ขนาด 1-2 μm เกิดขึ้น - มีทั้งลักษณะกลมและเป็น torus - มีสเฟียรูไลต์ลักษณะกลมขนาดเล็ก (1-2 μm) เกิดขึ้น - ไม่พบสเฟียรูไลต์ที่มีลักษณะเป็น torus

ตารางที่ 2.3 ผลของอัตราการทำให้เย็นต่อการเกิดสเฟียรูไลต์ที่เตรียมได้จากวัตถุดิบต่างๆ (ต่อ)

อัตราการทำให้เย็นตัว (cooling rate)	วัตถุดิบ	ลักษณะของสเฟียรูไลต์
ลดอุณหภูมิลงจาก 180 °C ถึง 130 °C ด้วยอัตรา 250 °C ต่อนาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงถึง 10 °C ด้วยอัตรา 1 หรือ 2.5 °C ต่อนาที	อะไมโลสจากแป้งข้าวโพด (Creek และคณะ, 2006)	- มีสเฟียรูไลต์เกิดขึ้นมาก - มีลักษณะคล้ายเจล
ลดอุณหภูมิลงจาก 93 °C ถึง 25 °C ภายในเวลา 7-12 นาที	สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสสูงกับกรดปาล์มมิติก (Fanta และคณะ, 2008)	- มีสเฟียรูไลต์เกิดขึ้นมาก - มีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลมขนาดเล็ก
ทำให้เย็นอย่างช้า โดยเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องจนครบเวลา 22 ชั่วโมง	แป้งข้าวโพด (Fanta และคณะ, 2002; Fanta และคณะ, 2005) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแป้งข้าวโพดกับกรดปาล์มมิติก (Fanta และคณะ, 2006) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสสูงกับกรดปาล์มมิติก (Fanta และคณะ, 2008)	- มีสเฟียรูไลต์เกิดขึ้น - มีทั้งลักษณะกลมและเป็น torus - แสดงลักษณะ “Maltese cross” - มีสเฟียรูไลต์เกิดขึ้น ส่วนใหญ่มีขนาดเล็กมีลักษณะเป็น torus - พบสเฟียรูไลต์ขนาดใหญ่เพียงเล็กน้อย - มีสเฟียรูไลต์เกิดขึ้นมาก - มีทั้งลักษณะกลมและเป็น torus

โดยทั่วไปการทำให้เย็นด้วยอัตราที่เร็วหรือช้ามากเกินไป จะขัดขวางการจัดเรียงตัวเกิดผลึกของสเฟียรูไลต์ เนื่องจากการทำให้เย็นด้วยอัตราที่เร็วมากเกินไปส่งผลให้มีเวลาในการแพร่และจัดเรียงตัวจำกัด ในขณะที่การทำให้เย็นด้วยอัตราที่ช้ามากเกินไป ทำให้เข้าใกล้จุดสมดุลของการ

จัดเรียงตัว (near-equilibrium rearrangement) จึงไม่สามารถเกิดสเฟียรูไลต์ได้ (Nordmark และ Ziegler, 2002a) ซึ่งการทำให้เย็นอย่างรวดเร็วโดยลดอุณหภูมิลงจาก 180 °C ถึง 130 °C ด้วยอัตรา 250 °C ต่อนาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงถึง 10 °C ด้วยอัตรา 1 หรือ 2.5 °C ต่อนาที พบว่ามีสเฟียรูไลต์เกิดขึ้นในปริมาณมากและลดส่วนที่ไม่ใช่สเฟียรูไลต์ที่มีสมบัติ birefringence ต่ำ (Creek และคณะ, 2006) นอกจากนี้ยังพบว่าผลของอัตราการทำให้เย็นต่อขนาดของสเฟียรูไลต์ ยังขึ้นอยู่กับชนิดของแป้งด้วย เช่น ขนาดของสเฟียรูไลต์ที่เตรียมจากอะไมโลสของแป้งข้าวโพดไม่ขึ้นกับอัตราการทำให้เย็น ในขณะที่สเฟียรูไลต์ที่เตรียมจากแป้งข้าวโพด (Creek และคณะ, 2006) และแป้งถั่วเขียว (Ziegler และคณะ, 2005) เมื่อทำให้เย็นอย่างรวดเร็วมีขนาดเพิ่มขึ้น และสเฟียรูไลต์ที่เตรียมจากแป้งถั่วเขียว โดยทำให้เย็นด้วยอัตราที่มากกว่า 50 °C ต่อนาที จะได้สเฟียรูไลต์ที่มีขนาดใกล้เคียงกัน (Ziegler และคณะ, 2005)

นอกจากนี้ยังพบว่าการเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60-70 °C หลังจากการทำให้เย็นตัวส่งผลต่อการรวมตัวของสเฟียรูไลต์ ทำให้สเฟียรูไลต์เกิดได้ดีขึ้น (Creek และคณะ, 2006; Ziegler และคณะ, 2005) ในขณะที่อุณหภูมิสูงกว่า 70 °C โมเลกุลแป้งไม่สามารถรวมตัวเกิดสเฟียรูไลต์ได้โดย Creek และคณะ (2006) พบว่าสเฟียรูไลต์เกิดได้ดีและมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อบ่มไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60 °C Ziegler และคณะ (2005) เตรียมสเฟียรูไลต์จากแป้งถั่วเขียวโดยหลังจากทำให้แป้งเย็นตัวลง นำตัวอย่างไปเก็บที่อุณหภูมิมากกว่า 85 °C พบว่าไม่มีสเฟียรูไลต์เกิดขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิมากกว่า 65 °C สเฟียรูไลต์ที่ได้เริ่มมีสมบัติ birefringence แบบ sheet ที่ใหญ่ขึ้น และที่อุณหภูมิต่ำกว่า 65 °C มีสเฟียรูไลต์เกิดขึ้นในปริมาณมาก

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Fanta และคณะ (2002) เตรียมสเฟียรูไลต์จากแป้งข้าวโพด แป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสสูง แป้งข้าว และแป้งธัญพืช โดยทำการเจลาติไนซ์แป้งในเครื่อง jet cooker โดยใช้อุณหภูมิ 140 °C และทำให้แป้งเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้เวลา 22 ชั่วโมง พบว่าสเฟียรูไลต์ที่ได้มี 2 ลักษณะคือ สเฟียรูไลต์ที่มีขนาดเล็ก มีลักษณะเป็น disc หรือ torus และสเฟียรูไลต์ที่มีขนาดใหญ่ มีลักษณะเป็น sphere หรือ lobe (2-lobe หรือ 4-lobe) จากวิธีการเตรียมด้วยสภาวะดังกล่าวพบว่า ปริมาณสเฟียรูไลต์ที่ได้เท่ากับ 10% จากปริมาณแป้งทั้งหมด ในขณะที่การเตรียมสเฟียรูไลต์จากแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว แป้งข้าวโพดกับแป้งมันฝรั่งที่กำจัดไขมันออก พบว่าไม่มีสเฟียรูไลต์เกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่าอะไมโลสและไขมันที่มีอยู่ในแป้งมีผลต่อการเกิดสเฟียรูไลต์

Peterson และคณะ (2005) ได้ศึกษาจำแนกและเปรียบเทียบลักษณะของสเฟียรูไลต์ที่เตรียมจากสารประกอบระหว่างแป้งข้าวโพดกับไขมันที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นแป้ง 4% และใช้

สภาวะในการเตรียมเดียวกันกับงานวิจัยของ Fanta และคณะ (2002) พบว่าที่อุณหภูมิ 86 °C มีสเฟียรูไลด์ที่มีลักษณะเป็น sphere หรือ lobe เกิดขึ้น ในขณะที่สเฟียรูไลด์ที่มีลักษณะเป็น torus หรือ disc จะพบที่อุณหภูมิต่ำกว่า

Fanta และคณะ (2005) ศึกษาผลของความเข้มข้นของแป้งข้าวโพด การเติมน้ำมันมิเนอรัล และอัตราการทำให้เย็นต่อการเตรียมสเฟียรูไลด์ พบว่าการเตรียมโดยใช้ความเข้มข้นแป้งในช่วง 4-5% ไม่มีการเติมน้ำมันมิเนอรัลและทำให้เย็นอย่างช้าๆ ภายใน 22 ชั่วโมง ได้สเฟียรูไลด์ขนาดเล็ก (1-2 μm) ที่มีลักษณะเป็น sphere ในขณะที่การเตรียมสเฟียรูไลด์ภายใต้สภาวะเดียวกัน โดยใช้ความเข้มข้นแป้งในช่วง 6.5-10% จะได้สเฟียรูไลด์ขนาดใหญ่ที่มีลักษณะเป็น disc หรือ torus และ sphere หรือ lobe เนื่องจากที่ความเข้มข้นสูง แป้งมีโอกาสที่จะกลับมารวมตัวเกิดเป็นสเฟียรูไลด์ได้มากกว่าสำหรับการเตรียมสเฟียรูไลด์โดยทำให้เย็นอย่างรวดเร็วภายใน 4 ชั่วโมง พบว่าสเฟียรูไลด์ที่ได้มีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับการทำให้เย็นอย่างช้าๆ เนื่องจากมีช่วงเวลาที่อยู่ในอุณหภูมิสูงน้อย ซึ่งสเฟียรูไลด์จะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่การเตรียมสเฟียรูไลด์ภายใต้สภาวะเดียวกันและมีการเติมน้ำมันมิเนอรัล จะได้สเฟียรูไลด์ขนาดเล็ก (1-2 μm) ที่มีลักษณะเป็น sphere

Fanta และคณะ (2006) ได้ศึกษาผลของโครงสร้างของกรดไขมันต่อลักษณะของสเฟียรูไลด์ที่เตรียมได้จากแป้งข้าวโพดที่มีการกำจัดไขมันออก พบว่าการใช้กรดปาล์มมิติกจะได้สเฟียรูไลด์ที่มีลักษณะเป็น torus หรือ disc มีลักษณะผลึกแบบ 6₁V และการใช้กรดลิโนเลอิกจะได้สเฟียรูไลด์ที่มีลักษณะเป็น sphere หรือ lobe มีลักษณะผลึกแบบ 7₁V ซึ่งชนิดของกรดไขมันที่ใช้มีผลต่อลักษณะของสเฟียรูไลด์ ทำให้สเฟียรูไลด์ที่ได้มีลักษณะแตกต่างกัน นอกจากนี้การใช้กรดไขมันส่งผลให้ได้ปริมาณสเฟียรูไลด์สูงขึ้น

Fanta และคณะ (2008) ที่ได้ศึกษาลักษณะของสเฟียรูไลด์ที่เตรียมจากสารประกอบระหว่างแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสสูงและกรดไขมัน (กรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก) โดยใช้กรดไขมันในปริมาณแตกต่างกัน และใช้อัตราการทำให้เย็นลงที่ระดับต่างๆ พบว่าการใช้กรดไขมันปริมาณ 5% ของปริมาณอะไมโลส ทำให้ได้ผลผลิตสเฟียรูไลด์เท่ากับ 60% ของปริมาณแป้งทั้งหมด เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแป้งและกรดไขมันมีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำจึงแยกส่วนออกจากน้ำและชักนำให้เกิดสเฟียรูไลด์มากขึ้น และยังพบว่า การทำให้เย็นอย่างช้าๆ ร่วมกับการกวนจะได้สเฟียรูไลด์ที่มีลักษณะเป็น torus หรือ disc และ sphere หรือ lobe แต่เมื่อไม่มีการกวน พบว่ามีสเฟียรูไลด์ขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การทำให้เย็นอย่างรวดเร็วจะได้สเฟียรูไลด์ที่มีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลมขนาดเล็กทั้งหมด จากการศึกษาชี้ให้เห็นว่าความสามารถในการละลายน้ำของกรดไขมัน อัตราการทำให้เย็น และปริมาณกรดไขมันที่ใช้ล้วนส่งผลต่อลักษณะของสเฟียรูไลด์

Nordmark และ Ziegler (2002a) ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกสเฟียรูไลต์ของแป้งข้าวโพด ที่เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นแป้ง 10% (w/w) นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 180 °C ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) และทำให้เย็นด้วยอัตราเร็วต่างๆ พบว่าสเฟียรูไลต์ที่ได้จากการทำให้เย็นอย่างรวดเร็วด้วยอัตรา 10 °C หรือ 500 °C ต่อนาที มีสมบัติ birefringence โดยแสดงลักษณะ “Maltese cross” อย่างชัดเจนและมีปริมาณสเฟียรูไลต์เกิดขึ้นมาก แต่สเฟียรูไลต์ที่ได้นั้นมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับการทำให้เย็นด้วยอัตรา 0.1°C และ 1 °C ต่อนาที ซึ่งได้สเฟียรูไลต์ที่มีขนาด 10-15 μm

Nordmark และ Ziegler (2002b) ศึกษาโครงสร้างของสเฟียรูไลต์ที่เตรียมจากแป้งข้าวโพด โดยใช้ความเข้มข้นแป้ง 10% (w/w) นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 180 °C เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Nordmark และ Ziegler (2002a) จากนั้นทำให้แป้งเย็นตัวลงด้วยอัตรา 150 °C ต่อนาที นำไปศึกษาลักษณะภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์ พบว่าสเฟียรูไลต์ที่ได้มีลักษณะและขนาดสม่ำเสมอทั้ง แสดงลักษณะ “Maltese cross”

Ziegler และคณะ (2003) ศึกษาการเตรียมสเฟียรูไลต์จากแป้งชนิดต่างๆ โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 180 °C และทำให้เย็นอย่างรวดเร็วด้วยอัตรา 150 °C ต่อนาที พบว่าการใช้แป้งถั่วเขียวและแป้งมันฝรั่งจะได้สเฟียรูไลต์ที่มีสมบัติ birefringence โดยแสดงลักษณะ “Maltese cross” อย่างชัดเจนในปริมาณมาก เช่นเดียวกับการเตรียมจากแป้งข้าวโพดที่ผ่านการตัดกิ่งด้วยกรด พบว่ามีปริมาณสเฟียรูไลต์เกิดขึ้นมาก ลักษณะกลม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 10-20 μm เนื่องจากปริมาณพอลิเมอร์เชิงเส้นที่เพิ่มขึ้น ทำให้การกลับมาจัดเรียงตัวเกิดเป็นสเฟียรูไลต์ได้ดีขึ้น ในขณะที่การเตรียมจากแป้งข้าวโพดเกิดสเฟียรูไลต์ได้น้อย และการใช้แป้งสาลี แป้งมันสำปะหลัง และแป้งสาธูปพบสเฟียรูไลต์เกิดขึ้นน้อยมาก และไม่พบสเฟียรูไลต์เกิดขึ้นจากการเตรียมโดยใช้แป้งข้าวโอ๊ต แป้งข้าว แป้งข้าวฟ่าง แป้ง amaranth และแป้ง yellow pea ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณอะไมโลสและพอลิเมอร์เชิงเส้นในแป้งแต่ละชนิดไม่เท่ากัน ซึ่งส่งผลต่อการเกิดสเฟียรูไลต์

Ziegler และคณะ (2005) เตรียมสเฟียรูไลต์จากแป้งถั่วเขียว โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 180 °C และทำให้เย็นด้วยอัตราต่างๆ พบว่าการทำให้เย็นด้วยอัตรา 250 °C ต่อนาที จะได้สเฟียรูไลต์ในปริมาณน้อยมากและมีโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ ในขณะที่การทำให้เย็นด้วยอัตรา 5 °C และ 10 °C ต่อนาที สเฟียรูไลต์ที่ได้มีขนาด 20-25 μm แสดงให้เห็นว่าการเกิดสเฟียรูไลต์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับการชักนำให้เกิดโดยสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสและกรดไขมันเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับอัตราที่ใช้ในการทำให้แป้งเย็นตัว

Bhosale และ Ziegler (2010) เตรียมสเฟียรูไลต์จากสารประกอบระหว่างอะไมโลสกับกรดปาล์มมิก พบว่ามีปริมาณสเฟียรูไลต์เกิดขึ้นมากและมีขนาดใหญ่ (15-25 μm) เมื่อเทียบกับการไม่เติมกรดปาล์มมิกซึ่งได้สเฟียรูไลต์ในปริมาณน้อยและมีขนาดเล็ก (10-15 μm) เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแป้งและกรดไขมันมีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำจึงแยกส่วนออกจากน้ำและชักนำให้เกิดสเฟียรูไลต์มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าสเฟียรูไลต์ที่ได้จากการเตรียมโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 180 °C และลดอุณหภูมิลงถึง 40 °C ด้วยอัตรา 1 °C ต่อนาที มีปริมาณแป้งที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ 28% ในขณะที่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140 °C และลดอุณหภูมิลงเท่ากับ 90 °C ด้วยอัตรา 1 °C ต่อนาที และลดอุณหภูมิลงจาก 90 °C ถึง 40 °C ด้วยอัตรา 0.04 °C ต่อนาที พบว่าสเฟียรูไลต์ที่ได้มีปริมาณแป้งที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์เพิ่มขึ้นเป็น 39%

Creek และคณะ (2006) เตรียมสเฟียรูไลต์จากอะไมโลสที่แยกได้จากแป้งข้าวโพด โดยใช้ความเข้มข้นอะไมโลส 10% (w/w) นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 180 °C และทำให้เย็นด้วยอัตราต่างๆ พบว่าการทำให้เย็นด้วยอัตรา 1 °C และ 2.5 °C ต่อนาที จะได้สเฟียรูไลต์ปริมาณน้อยและมีขนาดเล็ก เมื่อเทียบกับการทำให้เย็นโดยลดอุณหภูมิลงถึง 130 °C ด้วยอัตรา 250 °C ต่อนาที และลดอุณหภูมิลงจาก 130 °C ถึง 10 °C ด้วยอัตรา 1 °C และ 2.5 °C ต่อนาที จะได้สเฟียรูไลต์ในปริมาณมากและมีขนาดใหญ่ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการทำให้เย็นจาก 130 °C ถึง 10 °C ด้วยอัตรา 1 °C และ 2.5 °C ต่อนาที พบว่าการใช้อัตรา 2.5 °C ต่อนาที สเฟียรูไลต์จะมีขนาดเล็กกว่า แต่มีปริมาณสเฟียรูไลต์มากและเกิดได้ดีกว่า

Lay Ma และคณะ (2011) ได้ศึกษาผลของสัดส่วนระหว่างอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในแป้งต่อโครงสร้างของสเฟียรูไลต์ โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 180 °C และทำให้เย็นด้วยอัตรา 25 °C ต่อนาที พบว่าการใช้อะไมโลเพคตินจากแป้งข้าวโพดและแป้งมันฝรั่งในการเตรียมสเฟียรูไลต์ ไม่สามารถทำให้เกิดสเฟียรูไลต์ได้ ในขณะที่การเตรียมจากตัวอย่างที่มีปริมาณอะไมโลสสูง จะได้สเฟียรูไลต์ในปริมาณมากและมีลักษณะกลม ซึ่งการที่มีปริมาณอะไมโลสหรือพอลิเมอร์เชิงเส้นมากกว่าอะไมโลเพคตินหรือพอลิเมอร์เชิงกิ่งจะส่งผลให้สเฟียรูไลต์เกิดได้ดี