



2.1 แป้งมันสำปะหลัง

2.1.1 ลักษณะสำคัญทาง เคมีและกายภาพ

แป้ง เป็นคาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นโพลิเมอร์ (polymer) ของ α -D-glucose แป้งประกอบด้วยอะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพคติน (amylopectin) อะไมโลสเป็นโพลิเมอร์แบบสายตรงที่หน่วยกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -D-(1 \rightarrow 4) glucosidic มี anhydroglucose units (AGU) ประมาณ 200-2,000 หน่วย ส่วนอะไมโลเพคตินเป็นโพลิเมอร์ที่แตกเป็นสาขามากมาย ซึ่งหน่วยกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -D-(1 \rightarrow 4) glucosidic เป็นส่วนใหญ่ และส่วนที่แตกสาขาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -D-(1 \rightarrow 6) glucosidic แต่ละสาขาประกอบด้วยหน่วยกลูโคส (AGU) ประมาณ 15-25 หน่วย (9, 13) สำหรับแป้งมันสำปะหลังประกอบด้วยอะไมโลส คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 17 (14, 15) มีน้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลส และอะไมโลเพคตินประมาณ 210,000 และ 3×10^6 ตามลำดับ (16)

โดยทั่วไปเม็ดแป้งจะมีขนาดตั้งแต่ 2-100 ไมครอน อาจมีรูปกลม รูปไข่ และอื่น ๆ และแสดงลักษณะ birefringence หรือกาบาท (17) ซึ่งจะเห็นเป็น polarization crosses เมื่อตรวจเม็ดแป้งด้วยกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสง polarized เม็ดแป้งมันสำปะหลังจะมีรูปกลมปลายด้านหนึ่งเป็นรอยตัด จึงมีลักษณะคล้ายรูปถ้วย (9, 14) มีขนาดตั้งแต่ 5-35 ไมครอน (0.005-0.035 มม.) เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 15 ไมครอน (18)

2.1.2 การเกิด gelatinization ของแป้ง

เม็ดแป้งไม่ละลายในน้ำเย็น โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) เป็นจำนวนมากและยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (19) เมื่ออยู่ในน้ำ-เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย (9) เนื่องจากพันธะระหว่างโมเลกุลของเม็ดแป้งในบริเวณที่เป็นผลึก (crystalline regions) มีความแข็งแรงที่จะต้านทานต่อการละลาย-ได้ (20)

เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้ง จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ของเม็ดแป้ง จนกระทั่งถึงอุณหภูมิประมาณ 60-70^oซ (20) ซึ่งเรียกว่า ช่วงอุณหภูมิ gelatinization (17) ความร้อนทำให้พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonds) ที่ยึดโครงสร้างในเม็ดแป้ง เข้าด้วยกันแตกออก ทำให้ดูดซึมน้ำได้มากขึ้น เป็นผลให้เม็ดแป้งพองตัว ทำให้มีขนาดใหญ่กว่าเดิมหลายเท่า (9, 20) เม็ดแป้งจะสูญเสียลักษณะ birefringence เม็ดแป้งแต่ละเม็ดเริ่มพองตัวหรือ gelatinize ที่อุณหภูมิต่างกัน โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงต่างกันประมาณ 10^oซ ตารางที่ 2.1 แสดงช่วงอุณหภูมิ gelatinization ของแป้งชนิดต่าง ๆ (19) การพองตัวของเม็ดแป้งทำให้แป้งละลายน้ำได้ดีขึ้น paste จะมีความใสและความหนืดเพิ่มขึ้น ซึ่งปัจจัยสำคัญที่ควบคุมการพองตัวของเม็ดแป้งคือ แรงยึดระหว่างพันธะไฮโดรเจนภายในเม็ดแป้ง (12)

ตารางที่ 2.1 ลักษณะการ gelatinization ของแป้ง native

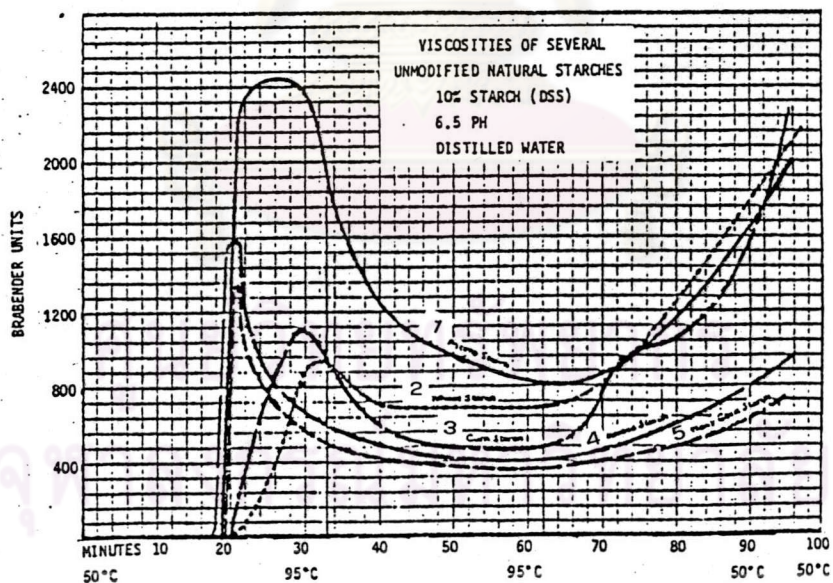
Starch		Gelatinization temp. range (°C)	At 95° C	
Species	Type		Swelling power ¹	Solubility(%)
Potato	Tuber	56-66	1,000	82
Tapioca	Root	58.5-70	71	48
Corn	Cereal	62-72	24	25
Sorghum	Cereal	68.5-75	22	22
Wheat	Cereal	52-63	21	41
Rice	Cereal	61-77.5	19	18
Waxy maize	Cereal	63-72	64	23
Waxy sorghum	Cereal	67.5-74	49	19

1 Swelling power มีค่าเท่ากับน้ำหนักของเม็ดแป้งที่พองตัวที่ตกตะกอนออกมาต่อกรัมของแป้งแห้ง (14)

2.1.3 ความหนืดของ paste จากแป้ง

เมื่ออุณหภูมิของน้ำแป้งสูงกว่าช่วงอุณหภูมิ gelatinization เม็ดแป้งแต่ละเม็ดจะเกิด gelatinization และพองตัวเต็มที่อย่างอิสระ โมเลกุลของแป้งที่อิมมersion นี้จะแยกตัวออกจาก network ของพันธะไฮโดรเจนภายในเม็ดแป้ง แล้วกระจายสู่สารละลายรอบ ๆ ทำให้เม็ดที่พองตัวแตกได้ง่ายขึ้น เมื่อมีการผสมที่รุนแรง ความหนืดของ paste จากแป้งที่เกิดขึ้นเนื่องจากสมบัติของเม็ดแป้งที่พองตัวแล้วขึ้นอยู่กับ interaction ระหว่างโมเลกุลของแป้งสายสั้น ๆ ที่ละลายน้ำออกมา กับส่วนของเม็ดแป้งที่กระจายตัวอยู่ (12)

โดยทั่วไปความหนืดของ paste จากแป้งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงยอดสูงสุด แล้วลดลงอย่างช้า ๆ หนึ่งให้ความร้อนต่อไปเรื่อย ๆ อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดหรืออุณหภูมิแป้งสุกเรียกว่า pasting temperature (19) ซึ่งสามารถติดตามได้โดยเครื่อง Brabender-Visco Amylograph (17) เครื่องมือนี้จะบันทึกความหนืดบน Brabender chart กราฟแสดงความหนืดของ paste จากแป้งแต่ละชนิดแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 (12)



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงความหนืด¹ ของ paste จากแป้งที่ยังไม่ได้แปรสภาพชนิดต่าง ๆ 1. แป้งมันฝรั่ง 2. แป้งสาลิ 3. แป้งข้าวโพด 4. แป้งมันสำปะหลัง 5. แป้ง waxy corn

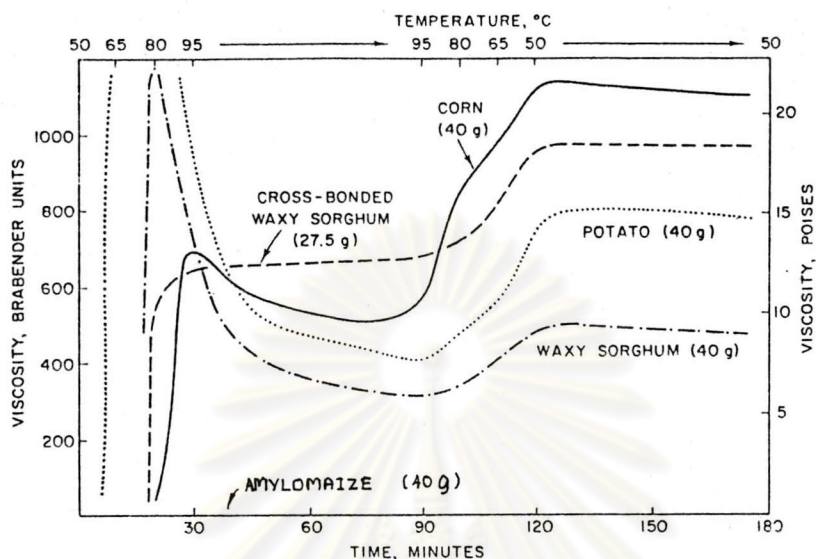
¹ วัดด้วยเครื่อง Brabender-Visco Amylograph

รูปแบบความหนืดของ paste จากแป้งชนิดต่าง ๆ ที่วัดด้วยเครื่อง Brabender-Visco Amylograph แตกต่างกันขึ้นอยู่กับขอบเขตการพองตัวของเม็ดแป้ง และความต้านทานของเม็ดแป้งที่พองตัวเมื่อได้รับความร้อนหรือแรงเฉือน (shear) ที่จะไม่สลายตัวและแตกออก ดังนั้นจึงทำให้แป้งลักษณะกราฟดังแสดงในรูปที่ 2.2 ได้เป็น 4 แบบ คือ (21)

1. แบบเอ เป็นลักษณะของกราฟที่ได้จากเม็ดแป้งที่มีการพองตัวสูง (High-swelling starches) ได้แก่ แป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง แป้ง waxy จากธัญพืช เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งเหล่านี้ เม็ดแป้งจะมีการพองตัวมาก ทำให้แรงที่ยึดกันภายในโมเลกุลอ่อนตัวลง และเม็ดแป้งจะแตกออกเมื่อได้รับแรงเฉือน ดังนั้นลักษณะกราฟของความหนืดจึงสูงขึ้น แล้วลดลงอย่างรวดเร็วระหว่างการต้มสุก
2. แบบบี เป็นกราฟของเม็ดแป้งที่มีการพองตัวปานกลาง (Moderate-swelling starches) ได้แก่ แป้งจากธัญพืชทั่วไป เนื่องจากเม็ดแป้งจะไม่พองตัวมากถึงกับแตกออก ลักษณะกราฟของความหนืดจึงสูงขึ้นน้อยกว่า และเกิดการสลายตัวระหว่างการต้มสุกน้อยกว่า
3. แบบซี เป็นกราฟของเม็ดแป้งที่มีการพองตัวน้อย (Restricted-swelling starches) ได้แก่ แป้งถั่วต่าง ๆ และแป้งแปรสภาพทางเคมีโดยการ cross-linking การ cross-linking ภายในเม็ดแป้งทำให้การพองตัวและการละลายลดลง และยังทำให้เม็ดแป้งที่พองตัวมีเสถียรภาพมากขึ้น ดังนั้นลักษณะกราฟของความหนืดจึงไม่ปรากฏ เป็นยอดสูงสุดแต่มีค่าความหนืดสูงซึ่งอาจจะคงที่หรือเพิ่มขึ้นระหว่างการต้มสุก
4. แบบดี เป็นกราฟของเม็ดแป้งที่มีการพองตัวน้อยมาก (Highly-restricted swelling starches) ได้แก่ แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูง เช่น แป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสร้อยละ 55-70

สำหรับแป้งมันสำปะหลังจะเกิด gelatinization ที่อุณหภูมิต่ำกว่าแป้งจากธัญพืช (cereal starches) เช่น แป้งสาลี แป้งข้าวโพด และแป้ง waxy maize เป็นต้น และอัตราการเพิ่มของความหนืดจะรวดเร็วกว่า นอกจากนี้ยังเกิดการสลายตัวมากกว่าถ้าเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ความหนืดลดลงเช่นเดียวกับแป้งมันฝรั่ง (9) ขณะต้มสุกจะเกิด paste ที่อุณหภูมิประมาณ 60-65 °C (15) Taylor และ Schoch พบว่าเม็ดแป้งมันสำปะหลังจะแตกออก

อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 80°C (18)



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความหนืด¹ ของ paste จากแป้งที่มีการพองตัวแบบต่าง ๆ โดยความเข้มข้นของน้ำแป้งที่ใช้ เป็นกรัมของน้ำหนักแป้งแห้งต่อน้ำแป้ง 500 มิลลิลิตร

- แบบเอ ได้แก่ แป้งมันฝรั่ง แป้ง waxy sorghum
 แบบบี ได้แก่ แป้งข้าวโพด
 แบบซี ได้แก่ แป้ง cross-bonded waxy sorghum
 แบบดี ได้แก่ แป้ง amylomaize

1 วัดด้วยเครื่อง Brabender-Visco Amylograph

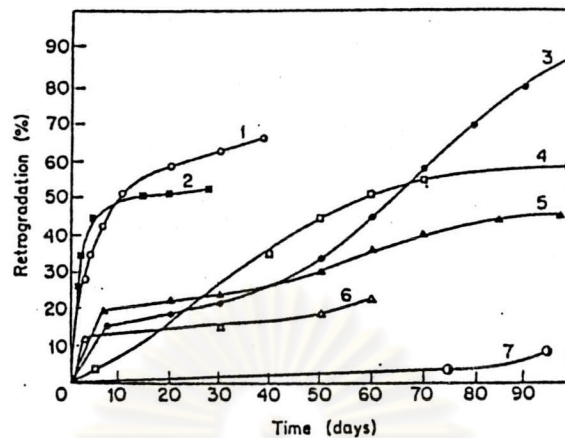
2.1.4 Retrogradation ของแป้ง

Retrogradation เป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของอะไมโลสใน เม็ดแป้ง-ที่พองตัวแล้ว กระจายตัวอยู่ในสารละลาย มีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันทำให้เกิดการตกผลึกเพิ่มขึ้น เมื่อสารละลายแป้งเจือจาง (ประมาณไม่เกินร้อยละ 2) ส่วน paste จากแป้งที่มีความเข้มข้นสูงกว่าซึ่งพบในผลิตภัณฑ์อาหารทั่วไป โมเลกุลของอะไมโลสจะรวมตัวกันเองมากขึ้นและรวมกับอะไมโลเพคติน ทำให้เกิดเป็นเจลที่แน่นระหว่างการเก็บ (22)

แป้งที่เกิด retrogradation แล้วจะมีความต้านทานต่อการย่อยสลายโดย เอ็นไซม์ย่อยอะไมโลส สามารถละลายน้ำได้เล็กน้อยที่อุณหภูมิธรรมดา และกระจายตัวได้ยากขึ้นแม้ที่อุณหภูมิสูง ๆ ไม่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงินกับไอโอดีน และในสารละลายแป้งเจือจางจะมีความหนืดลดลง (23)

การศึกษาอัตราการเกิด retrogradation ของแป้งชนิดต่าง ๆ แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 (22) เส้นกราฟแสดงให้เห็นถึง การตกตะกอนจากน้ำแป้งร้อยละ 2 ที่ 0.2°C จะเห็นได้ว่า แป้งจากธัญพืชจะเกิด retrogradation เร็วกว่าแป้งจากพืชจำพวกหัว เนื่องจากมีปริมาณอะไมโลสสูง และโมเลกุลของอะไมโลสมีขนาดพอเหมาะ จึงรวมตัวกันได้ง่าย และตกตะกอนออกมาอย่างรวดเร็ว (14, 21) ส่วนแป้ง waxy ซึ่งประกอบด้วยอะไมโลเพคตินเกือบร้อยละ 100 จะเกิด retrogradation ได้ช้ามากเพราะ โมเลกุลมีขนาดใหญ่และแตกเป็นสาขามากมาย จึงจะเกิดการตกผลึกยาก (22) สำหรับแป้งมันสำปะหลังซึ่งมีปริมาณอะไมโลเพคตินสูงประมาณร้อยละ 83 มีแนวโน้มที่จะเกิดปรากฏการณ์นี้เพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่า อะไมโลส จากแป้งต่างชนิดกันจะเกิด retrogradation ด้วยอัตราเร็วที่ต่างกัน เพราะมีน้ำหนักโมเลกุลต่างกัน อัตราการเกิด retrogradation จะสูงสุดถ้าโมเลกุลมีความยาว chain ปานกลาง ในโมเลกุลใหญ่ ๆ การเคลื่อนไหวช้า รวมตัวกันได้ยากกว่า ขณะที่โมเลกุลเล็ก ๆ มีการเคลื่อนที่แบบ Brownian ซึ่งไม่เป็นระเบียบ เกิดการรวมตัวได้ยากเช่นกัน (22)

อัตราการเกิด retrogradation เพิ่มขึ้นแม้มีความเข้มข้นของกรดแก่เพียง เล็กน้อย เช่น กรดซัลฟูริก หรือกรดเกลือ Smirnov พบว่าที่ pH 2 อัตราการเกิด retrogradation จะเพิ่มขึ้นประมาณ 4 เท่าของที่ pH 6 แต่สารละลายต่างยับยั้งการเกิด retrogradation เพราะสามารถละลายแป้งได้ (22)



รูปที่ 2.3 อัตราการเกิด retrogradation ของแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 1. แป้งข้าวโพด 2. แป้งสาลี 3. แป้งมันฝรั่ง 4. แป้งมันเทศ 5. แป้ง arrowroot 6. แป้งมันสำปะหลัง 7. แป้ง waxy corn

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ retrogradation นี้มีความสำคัญในอุตสาหกรรมการใช้แป้ง เพราะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อของอาหารที่ไม่ต้องการ เช่น การแข็งตัว (set) ของ paste จากแป้ง และการทำให้เนื้อขนมปังแห้ง (stale) เป็นต้น นอกจากนี้ paste จากแป้งที่เกิด retrogradation แล้วจะมีความใส (clarity) ลดลง

2.2 การแปรสภาพแป้ง

การแปรสภาพแป้งเป็นการปรับปรุงสมบัติของแป้งให้มีลักษณะเป็นที่ต้องการในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรม กรรมวิธีการแปรสภาพได้แก่ การแปรสภาพแป้งโดยวิธีทาง Genetic การแปรสภาพแป้งโดยวิธีทางเคมี การแปรสภาพแป้งโดยวิธีทางกายภาพ และการแปรสภาพแป้ง - โดยการใช้เอนไซม์ (9) แต่ในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาเฉพาะการแปรสภาพแป้งโดยวิธีทางเคมี

การแปรสภาพแป้งโดยวิธีทางเคมีเป็นการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของแป้ง native โดยทำปฏิกิริยากับสารเคมีเพียงเล็กน้อยเพื่อให้ได้สมบัติของแป้งตามต้องการ (24) และเป็น non-degradative modification เพราะโครงสร้างของโพลีเมอร์เปลี่ยนแปลงน้อยมาก (10) เนื่องจากแป้งที่ไม่ได้แปรสภาพมีเสถียรภาพต่ำ และไม่สามารถทนต่อสภาพ

pH ต่ำ ๆ ในอาหาร กระบวนการผลิตที่ใช้ความร้อนสูง หรือเครื่องมือที่ใช้การผสมอย่างรุนแรง จึงได้มีการพัฒนาการแปรรูปแป้ง เพื่อให้ได้คุณภาพที่ต้องการในการนำไปใช้ในอาหาร แป้งแปรรูปนี้อาจเรียกว่า อนุพันธ์ของแป้งก็ได้ แป้งแปรรูปสำหรับการใช้ในอาหารและเป็นที่ยอมรับของสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาของประเทศสหรัฐอเมริกา (FDA) แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 ซึ่งรวบรวมกรรมวิธีสำคัญ ๆ ที่ใช้ในการผลิตแป้งแปรรูป (24)

ตารางที่ 2.2 ชนิดและสมบัติของแป้งแปรรูปทางเคมีชนิดต่าง ๆ

Modified Starch	Properties
Bleached starch	Oxidized Lighten color, sterilized
Converted starch	Hydrolyzed Reduces viscosity
(a) Thin boiling starch	Fluidity
(b) Dextrins	Dry roasted
(c) Oxidized starch	Creaminess, short body
Crosslinked starch	Strengthens granule Increases viscosity Tolerance to acidity Yields shear resistance
Stabilized starch	Heat penetration Resist retrogradation Add specific functional properties Low temperature stability

สมบัติสำคัญของแป้งที่นำมาใช้ในการผลิตอาหารคือ ความสามารถในการพองตัวและการให้ paste ที่ขึ้นหนืดเมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อน แต่การใช้ความร้อนสูง ๆ สามารถทำให้พันธะไฮโดรเจนภายในโครงสร้างของเม็ดแป้งลดลง ทำให้เม็ดแป้งบางชนิดแตกง่ายและความหนืดลดลง การแปรสภาพแป้งโดยวิธีทางเคมีสามารถช่วยควบคุมความสามารถในการพองตัว ความสามารถในการละลาย ความสามารถในการเกิด retrogradation และอื่น ๆ ได้กรรมวิธีการแปรสภาพทางเคมีได้แก่ การย่อยสลายด้วยกรด (acid hydrolysis) จะตัดโมเลกุลแป้งให้สั้นลง เป็นผลให้เม็ดแป้งสามารถพองตัวและละลายน้ำเพิ่มขึ้น ความหนืดเมื่อร้อนลดลงการทำ esterification หรือ etherification จะทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นเนื่องจากกลุ่มที่เข้าไปแทนที่ไปลดพันธะไฮโดรเจนที่มีอยู่เดิมภายใน เม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งพองตัวได้ง่ายขึ้น และการ cross-linking ของแป้งจะเพิ่มพันธะที่เชื่อมโมเลกุลแป้งทำให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงขึ้น จึงสามารถควบคุมการพองตัวและการแตกตัวของเม็ดแป้งที่อุณหภูมิสูงได้ (19)

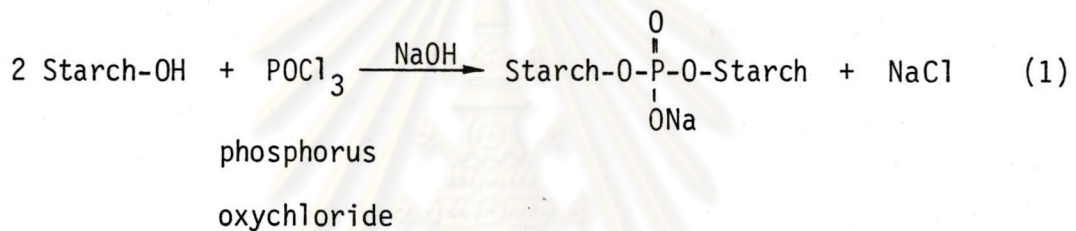
เนื่องจากเม็ดแป้งมันสำปะหลังมีช่วงอุณหภูมิ gelatinization ต่ำ มีการพองตัวอย่างรวดเร็ว (19) และมีแนวโน้มที่จะแตกออก (break down) สูงมาก (9) เมื่อเกิดเป็น paste จะมีความหนืด ซึ่งเมื่อใช้ช้อนตัก paste ที่ได้จะมีลักษณะเป็นสายยาว (stringy) และเมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นจะเหลว (thin) เพราะโครงสร้างภายในเม็ดแป้งเกิดการสลายตัวและแตกออก จึงไม่เหมาะสำหรับการใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารส่วนใหญ่ที่ต้องใช้ความร้อน แม้จะมีความใส ความสามารถในการอุ้มน้ำ (water binding capacity) และแนวโน้มที่จะเกิด retrogradation ต่ำซึ่งเป็นลักษณะที่ดีที่ต้องการในหลายผลิตภัณฑ์ก็ตาม (20) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาการแปรสภาพแป้งมันสำปะหลังโดยการ cross-linking เพื่อลดการพองตัวของเม็ดแป้ง ทำให้ความหนืดของ paste จากแป้งมีเสถียรภาพดีขึ้นในสภาวะการผลิตที่ใช้อุณหภูมิสูง มี pH เป็นกรด และมีการผสมที่รุนแรง

การทำ cross-linking ของแป้งเพื่อการใช้ในอาหาร สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาของทั้งประเทศไทยและประเทศสหรัฐอเมริกา (24) ได้กำหนดชนิดของสารเคมีที่ได้รับอนุญาตและข้อจำกัดในการใช้ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 2.3 สารเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล ได้มากกว่า 1 หมู่บนเม็ดแป้งที่ยังไม่เกิด gelatinization (20, 25) เพื่อสร้าง cross-linksหรือพันธะ covalent ระหว่างโพลีเมอร์ของแป้ง ทำให้แรงยึดภายในโครงสร้างของเม็ดแป้งมีความแข็งแรงขึ้น

ตารางที่ 2.3 สารเคมีที่ใช้ทำการ cross-linking ของแป้งเพื่อใช้ในอาหาร

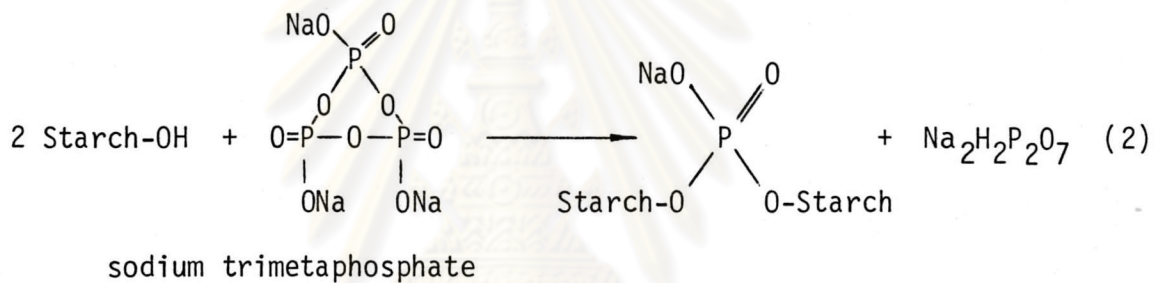
ชนิดของสารเคมี	ข้อกำหนด
อะดิปิกอันไฮไดรด์ (Adipic anhydride) ไม่เกินร้อยละ 0.12	-
ฟอสฟอรัส ออกซิคลอไรด์ (Phosphorus oxychloride) ไม่เกินร้อยละ 0.1	-
โซเดียมไตรเมต้าฟอสเฟต (Sodium trimetaphosphate)	มีฟอสเฟต (phosphate) ตกค้าง ในแป้งแปรสภาพได้ไม่เกินร้อยละ 0.04 โดยคำนวณในรูปฟอสฟอรัส (phosphorus)
อีพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin) ไม่เกินร้อยละ 0.3	-

ในปี ค.ศ. 1940 Felton และ Schopmeyer ใช้ฟอสฟอรัส ออกซิคลอไรด์ (phosphorus oxychloride) ร้อยละ 0.15-0.25 (โดยน้ำหนักของแป้ง) ทำการ cross-linking แป้งโดยใช้กระบวนการ suspension ซึ่งทำได้โดยเตรียมน้ำแป้งจากเมล็ดแป้งที่ยังไม่เกิด gelatinization ความเข้มข้นของน้ำแป้งประมาณร้อยละ 40 ปรับ pH เป็น 10 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยา 25^o หลังจากเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์แล้ว ปรับ pH ให้เป็นกลาง กรองผลิตภัณฑ์แป้งที่ได้ ล้าง และทำให้แห้ง ปฏิกิริยาการ cross-linking เกิดขึ้นตามปฏิกิริยาที่ 1 (25) แป้งแปรสภาพที่ได้ยังคงลักษณะ เป็น เม็ดแป้ง ซึ่งจะให้ paste เหนียวมีเสถียรภาพของความหนืดระหว่างการให้ความร้อนสูง (26) และมีการพองตัวของเม็ดแป้งจำกัด (27)



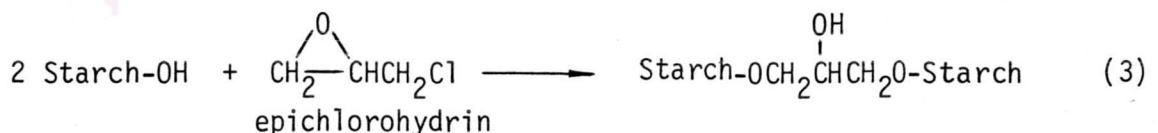
ต่อมา Wetzstein และ Lyon (28) พบว่า การเติม alkali ที่ละลายน้ำได้หรือเกลือ alkaline metal เช่น โซเดียมคลอไรด์ ลงในน้ำแป้งจะควบคุมการเกิดปฏิกิริยา cross-linking ได้ดีขึ้น เนื่องจากสามารถลดการสลายตัวของฟอสฟอรัสออกซิคลอไรด์ ทำให้สารเคมีสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเม็ดแป้งได้มากขึ้น โดยทดลอง เตรียมน้ำแป้ง (น้ำหนักแป้งแห้ง 1,000 กรัมต่อน้ำ 1,500 มิลลิลิตร) ใช้กระบวนการ suspension ปรับ pH ให้มีค่าประมาณ 11 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเติมโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักของแป้งแห้ง ขณะที่ผสมสารละลายอย่างช้า ๆ เติมฟอสฟอรัส ออกซิคลอไรด์ร้อยละ 0.15 ลงไปที่อุณหภูมิห้องจนส่วนผสมอยู่ตลอดเวลาเป็นเวลาครึ่งชั่วโมง หยุดปฏิกิริยาโดยการเติมสารละลายกรดเกลือร้อยละ 2 ให้มี pH 5 กรองแป้งแปรสภาพที่ได้ ล้างด้วยน้ำกลั่น 2 ลิตร 2 ครั้ง กรองแล้วทำให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิประมาณ 50^o ช ทั้งไว้ 1 คืน แป้งแปรสภาพที่ได้ จะมีการ cross-linking ที่สม่ำเสมอดีขึ้น (26)

ในปี ค.ศ. 1954 Kerr และ Cleveland (29) ได้พัฒนาการใช้เกลือ ไตรเมต้าฟอสเฟต ที่ละลายน้ำได้ในการเตรียมแป้งแปรสภาพโดยการ cross-linking สำหรับอุตสาหกรรม แต่สภาวะของการเกิดปฏิกิริยาต้องรุนแรงกว่าการใช้ฟอสฟอรัสออกซิคลอไรด์ (30) โดยเตรียมน้ำแป้งจากแป้งข้าวโพดที่มีความชื้นร้อยละ 10 หนัก 180 กรัมต่อน้ำ 325 มิลลิลิตร ใช้กระบวนการ suspension ซึ่งมีโซเดียมไตรเมต้าฟอสเฟต 3.3 กรัมละลายอยู่ด้วย ปรับ pH เป็น 10.2 ด้วยโซเดียมคาร์บอเนต ให้ความร้อนส่วนผสมจนถึงอุณหภูมิประมาณ 50°ซ หรือต่ำกว่าอุณหภูมิที่เม็ดแป้งเกิดการพองตัวหรือเกิด paste หลังจากสิ้นสุดปฏิกิริยาแล้ว ปรับ pH ให้เป็นกลาง (6.7) กรองผลิตภัณฑ์ที่ได้ ล้างแล้วทำให้แห้ง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงไว้ในปฏิกิริยาที่ 2 (26) แป้งแปรสภาพที่ได้ยังคงลักษณะเป็นเม็ดแป้ง เกิดการ gelatinization ได้ยากขึ้นและมีเสถียรภาพดีขึ้นขณะให้ความร้อนสูง ๆ



ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากทั้ง 2 วิธีเป็นไดสตาร์ซฟอสเฟต เอสเตอร์ (distarch phosphate esters) แต่ก็อาจมี mono- และ trisubstituted esters เกิดขึ้นด้วยเล็กน้อย (26)

ในปี ค.ศ. 1945 Konigsberg (31) ได้ค้นพบการเตรียมไดสตาร์ซกลีเซอรอล (distarch glycerol) จากปฏิกิริยาระหว่างเม็ดแป้งกับอีพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin) โดยกระบวนการ suspension ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ 3 (25) พบว่าแป้งแปรสภาพที่ได้มีสมบัติคล้ายกับแป้งที่ได้จากการใช้ฟอสฟอรัส ออกซิคลอไรด์



ในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาการ cross-linking ด้วยสารโซเดียมไตรเมต้าฟอสเฟต ตามวิธีของ Kerr และ Cleveland (29) เพราะเป็นสารที่สามารถทำได้ในประเทศและนิยมใช้ในการแปรสภาพแป้งแบบ cross-linking สำหรับอุตสาหกรรมเพื่อการนำไปใช้ในอาหาร (24)

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของแป้งแปรสภาพโดยการ cross-linking

เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายแป้งที่แปรสภาพโดยการ cross-linking แล้ว เม็ดแป้งจะพองตัว แม้พันธะไฮโดรเจนจะแตกออก (9) แต่เม็ดแป้งที่พองตัวนี้จะไม่สลายตัว (12) สมบัติของแป้งแปรสภาพโดยการ cross-linking ระหว่างการต้มสุกขึ้นกับระดับการ cross-linking หรือระดับการแทนที่ (9) โดยทั่วไปการใช้ในอาหารจะทำการ cross-linking ในระดับต่ำ ๆ คือประมาณ 1 cross-link ต่อ AGU 100-1,000 หน่วย (25, 30)

ในการเตรียมแป้งแปรสภาพโดยการ cross-linking ตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อระดับการ cross-linking คือ

1. ปริมาณของสารเคมีที่ใช้ ถ้าปริมาณของสารที่ใช้มากขึ้นระดับการ cross-linking สูงขึ้น (30)
2. เวลาของปฏิกิริยาการ cross-linking ถ้าเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้นระดับการ cross-linking จะสูงขึ้น (10)

ผลของระดับการ cross-linking จะปรับปรุงสมบัติบางอย่างของแป้งให้เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิตอาหารที่สภาวะต่างๆดังนี้

1. การพองตัวของเม็ดแป้ง

Kite (29) ได้ทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ของระดับการ cross-linking ด้วยฟอสเฟต ที่มีต่อการพองตัวของเม็ดแป้ง waxy sorghum พบว่า การ cross-linking เพียงระดับต่ำ ๆ ประมาณ 1 cross-link ต่อ AGU 200-300 หน่วย ก็สามารถทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งแน่นขึ้น และจำกัดการพองตัวของเม็ดแป้งซึ่งเดิมมีการพองตัวสูงมาก สามารถทนต่อความร้อนในระหว่างการต้มสุก (11) มีช่วงการอมน้ำสูงสุดเพิ่มขึ้น (maximum hydration) เมื่อระดับการ cross-linking เพิ่มขึ้น ความสามารถในการพองตัวจะลดลงไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งระดับการ cross-linking สูง ๆ ประมาณ 1 cross-link ต่อ AGU 20 หน่วย เม็ดแป้งจะพองตัวในน้ำเดือดได้น้อยมาก เนื่องจากไม่สามารถดูดน้ำได้เต็มที่ การเกิด gelatinization ของเม็ดแป้งจะยากขึ้นเรื่อย ๆ (12)

2. ความหนืดของ paste จากแป้ง

Kite (30) ได้ทำการศึกษาความหนืดด้วยเครื่อง Brabender-Visco Amylograph ของแป้ง waxy sorghum ที่ทำการ cross-linking ด้วยโซเดียมไตรเมตา-

ฟอสเฟต ระดับต่าง ๆ พบว่าแป้ง waxy sorghum ที่ยังไม่ได้แปรสภาพจะเกิดเป็น paste อย่างรวดเร็ว และเกิดการสลายตัวขณะให้ความร้อนและการผสมต่อไป แต่แป้งที่ทำการ cross-linking ระดับต่ำ ๆ จะทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นระหว่างการให้ความร้อนและการสลายตัวลดลง เมื่อระดับการ cross-linking เพิ่มขึ้น ความหนืดจะไม่ปรากฏเป็นยอดสูงสุด แต่จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ระหว่างการให้ความร้อน จนกระทั่งที่ระดับการ cross-linking สูงมาก ความหนืดจะลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.4 นอกจากนี้ยังได้ศึกษาความหนืดของแป้งข้าวโพดที่ทำการ cross-linking ด้วยโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งจะได้รูปแบบของการเปลี่ยนแปลงความหนืดคล้าย ๆ กัน

แป้งแปรสภาพที่ทำการ cross-linking แล้ว จะมีเสถียรภาพของความหนืดเพิ่มขึ้น ในสภาวะรุนแรงต่าง ๆ (30) ดังนี้

1. ในสภาวะ pH เป็นกรด ถ้าระดับการ cross-linking ของแป้งเพิ่มขึ้น เม็ดแป้งจะมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้นทำให้เม็ดแป้งลดการสลายตัวลง จากการศึกษาแป้ง waxy sorghum ซึ่งความหนืดจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ pH ต่ำกว่า 5 การ cross-linking จะทำให้แป้งเริ่มสูญเสียความหนืดที่ pH ต่ำกว่า 4 ดังนั้นการปรับระดับการ cross-linking ให้เหมาะสม จะปรับปรุงแป้งให้มีความหนืดสูงสุดที่ระดับ pHใด ๆ ของอาหารก็ได้

2. ในสภาวะการต้มสุกที่อุณหภูมิสูงและภายใต้ความดัน ความหนืดของ paste จากแป้งที่ยังไม่ได้แปรสภาพจะเหลวเมื่อผ่านกระบวนการผลิตดังกล่าว การ cross-linking ในระดับที่เหมาะสมจะทำให้เม็ดแป้งมีความต้านทานเพิ่มขึ้น

3. ในสภาวะที่มีการผสมอย่างรุนแรง เช่น การกวนหรือการสูบลัด ทำให้เม็ดแป้งแตกและสูญเสียความหนืด การ cross-linking จะทำให้เม็ดแป้งมีความต้านทานเพิ่มขึ้น

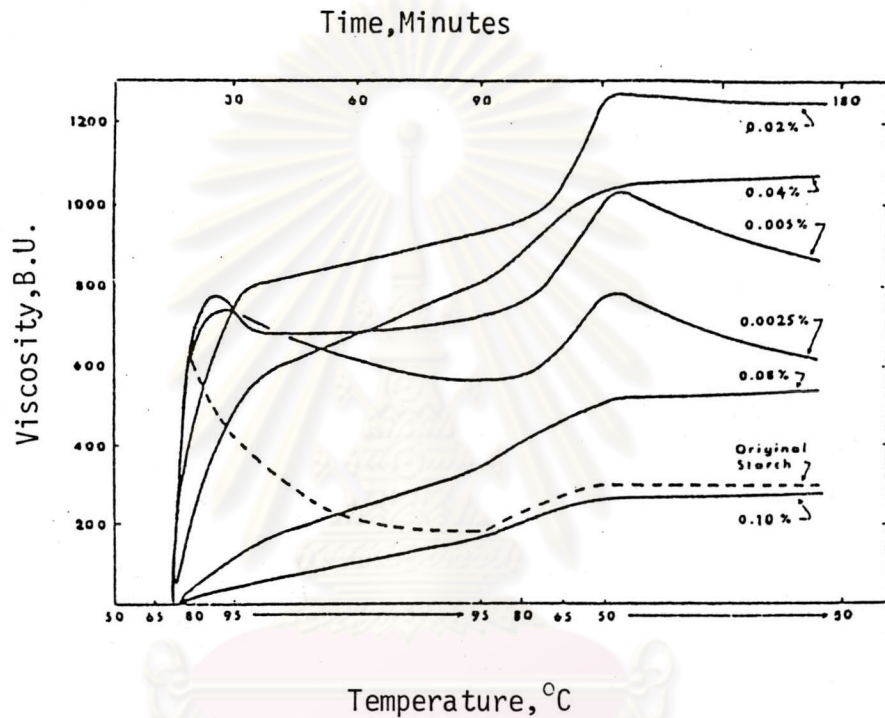
2.4 การประเมินผลการ cross-linking

การวิเคราะห์หาระดับการ cross-linking โดยตรงนั้นเป็นสิ่งที่ยากมากในทางปฏิบัติ ผู้ผลิตจะตรวจสอบมิติทางกายภาพของ paste จากแป้งแทน โดยทั่วไปจะวัดความหนืดและความสามารถในการพองตัวเป็นต้น (27)

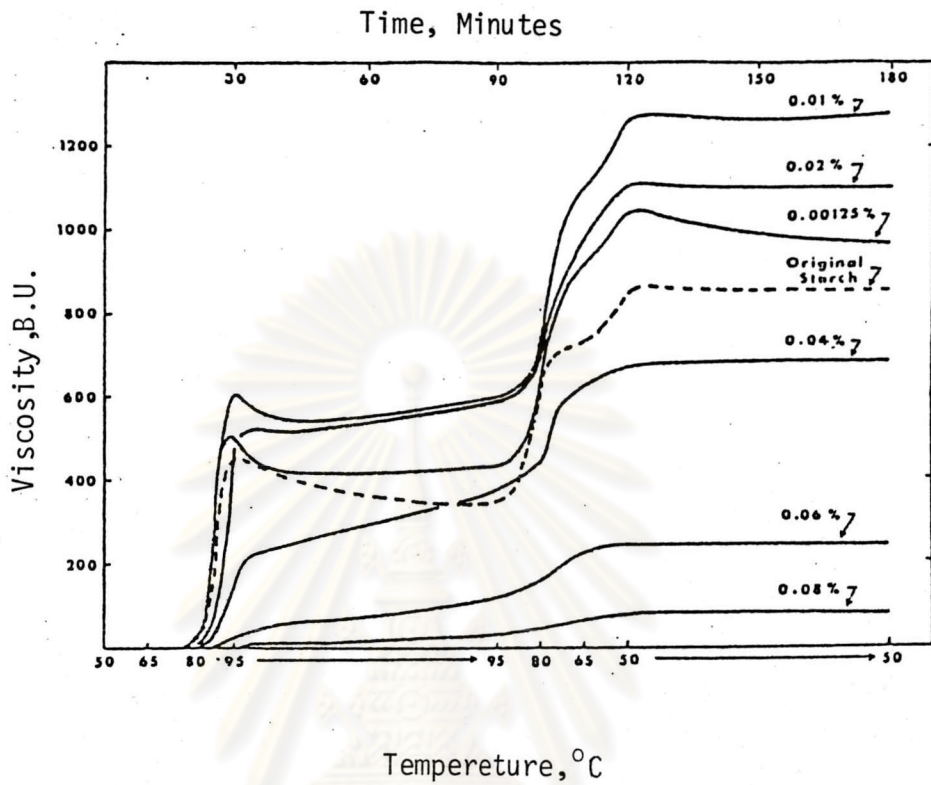
2.4.1 ความหนืดของ paste จากแป้ง เครื่องมือที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับบันทึกการเปลี่ยนแปลงความหนืดของ paste จากแป้งระหว่าง heating-cooking-

cooling cycle คือ Brabender-Visco Amylograph (10, 12, 27) ซึ่งยังสามารถใช้ตรวจสอบชนิดของแป้งและขอบเขตการแปรสภาพแป้งได้ด้วย (32)

ภายในเครื่อง Brabender-Visco Amylograph น้ำแป้งจะถูกทำให้ร้อนด้วยอัตราคงที่ จนถึงอุณหภูมิ 95^o ขณะที่มีการกวนด้วยอัตราคงที่ตลอดเวลา ทั้งไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา



รูปที่ 2.4 ความหนืดวัดด้วยเครื่อง Brabender-Visco Amylograph ของแป้ง waxy sorghum ที่ทำการ cross-linking ด้วยไตรเมต้าฟอสเฟต ปริมาณต่าง ๆ กัน (ปริมาณของไตรเมต้าฟอสเฟต คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของแป้งแห้ง)



รูปที่ 2.5 ความหนืดวัดด้วยเครื่อง Brabender-Visco Amylograph ของแป้งข้าวโพดที่ทำการ cross-linking ด้วยไตรเมต้าฟอสเฟต ปริมาณต่าง ๆ กัน (ปริมาณของไตรเมต้าฟอสเฟต คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของแป้งแห้ง)

1 ชั่วโมง แล้วค่อย ๆ ลดอุณหภูมิลงในอัตราเดียวกันจนถึง 50 °C และทิ้งไว้อีก 1 ชั่วโมง ความหนืดของ paste จากแป้งจะถูกบันทึกลงบนกระดาษกราฟเป็นเส้นโค้ง (Brabender viscosity curve) อย่างอัตโนมัติระหว่าง cooking และ cooling cycle การเปลี่ยนแปลงความหนืดระหว่าง heating-cooking-cooling cycle ของ paste จากแป้งที่ทำการ cross-linking จะแตกต่างกันตามระดับการ cross-linking ของแป้งแปรสภาพนั้น คือ เมื่อระดับการ cross-linking สูงขึ้นเล็กน้อย ความหนืดของ paste จากแป้งแปรสภาพจะมีค่าสูงขึ้น และมีเสถียรภาพของความหนืดระหว่าง heating cycle สูงกว่าแป้งที่ไม่ได้แปรสภาพด้วยการ cross-linking จนกระทั่งถึงระดับการ cross-linking ระดับหนึ่ง (ขึ้นกับชนิด

ของแป้ง) ซึ่งจะทำให้ paste จากแป้งแปรสภาพมีความหนืดสูงสุดและมีเสถียรภาพของความหนืดเพิ่มขึ้นหรือไม่มีการลดลงของความหนืดระหว่าง heating cycle หลังจากนั้นถ้าระดับการ cross-linking สูงมากขึ้นอีก paste จากแป้งแปรสภาพจะมีความหนืดต่ำลงเรื่อย ๆ แต่เสถียรภาพของความหนืดยังคงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และ 2.5 ซึ่งแสดงถึงปริมาณของไตรเมต้าฟอสเฟตระดับต่าง ๆ ที่มีผลต่อความหนืดของแป้ง waxy sorghum และแป้งข้าวโพดตามลำดับ จากกราฟปริมาณไตรเมต้าฟอสเฟตเพียงร้อยละ 0.02 ก็สามารถทำให้ paste จากแป้ง waxy sorghum มีความหนืดสูงสุดและเสถียรภาพของความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นระหว่าง heating cycle ถ้าใช้ปริมาณมากกว่านี้ จะจำกัดการพองตัวของเม็ดแป้ง ทำให้ความหนืดลดลง สำหรับแป้งข้าวโพด ปริมาณไตรเมต้าฟอสเฟตที่เหมาะสมคือร้อยละ 0.01 เท่านั้น (30)

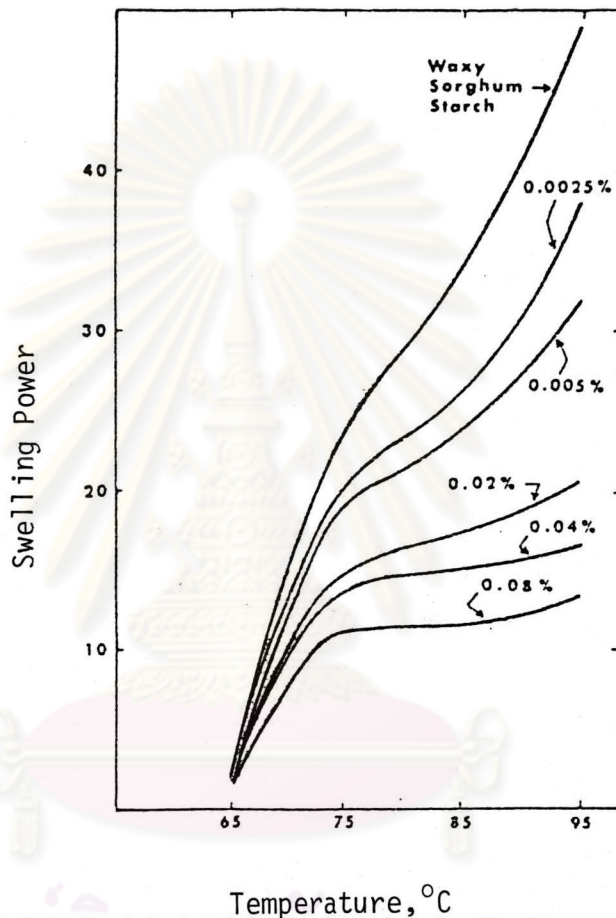
2.4.2 การพองตัวของเม็ดแป้ง การ cross-linking ในระดับต่าง ๆ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการพองตัวของเม็ดแป้ง การหาความสามารถในการพองตัวของเม็ดแป้ง (granule-swelling power) ใช้วิธีของ Leach และคณะ (9, 30) โดยนำแป้งแปรสภาพโดยการ cross-linking ที่ซึ่งน้ำหนักแล้วไปต้มสุกในน้ำที่อุณหภูมิที่ต้องการ ขณะเดียวกันต้องกวนอย่างเพียงพอที่จะทำให้เม็ดแป้งกระจายตัวในน้ำได้โดยไม่ทำให้เม็ดแป้งแตก แล้วนำไปเข้าเครื่องเหวี่ยง (centrifuge) เพื่อให้เม็ดแป้งที่พองตัวตกตะกอน คำนวณหาความสามารถในการพองตัว ซึ่งมีค่าเท่ากับ น้ำหนักของเม็ดแป้งที่พองตัวที่ตกตะกอนลงมาต่อกรัมของแป้งแห้ง รูปที่ 2.6 แสดงถึงความสามารถในการพองตัวของแป้ง waxy sorghum ที่แปรสภาพโดยการ cross-linking ด้วยไตรเมต้าฟอสเฟต ในปริมาณต่าง ๆ กัน ในช่วงอุณหภูมิต่างกัน 5^o C เม็ดแป้งเดิมมีการพองตัวสูงมาก เมื่อระดับการ cross-linking เพิ่มขึ้น ความสามารถในการพองตัวของเม็ดแป้งจะลดลงเรื่อย ๆ

ในงานวิจัยนี้จะติดตามขอบเขตการ cross-linking แป้งโดยตรวจหาความหนืดของ paste แป้งด้วยเครื่อง Brabender Visco-Amylograph เนื่องจากแป้งแปรสภาพที่ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารควรมีความหนืดและเสถียรภาพของความหนืดสูงขณะการให้ความร้อน

2.5 การนำแป้งแปรสภาพไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร

แป้งที่แปรสภาพโดยการ cross-linking จะมีเสถียรภาพต่อความร้อน การผสมที่รุนแรงและสภาวะที่เป็นกรด จึงนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในอาหารเด็กอ่อน ไล้ขนมพายผลไม้

salad dressing (26) ซุปกระป๋อง น้ำเกรวี่ และซอสที่ต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคนในหม้อนึ่ง (retort) ซุปข้าวโพดกระป๋อง (27) และผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ ที่ต้องการทำให้ข้นและทำให้เนื้ออาหารกระจายตัวได้ในสารละลายระหว่างการบรรจุ (9)



รูปที่ 2.6 ความสามารถในการพองตัวของแป้ง waxy sorghum ที่ทำการ cross-linking ด้วยไตรเมต้าฟอสเฟต ปริมาณต่าง ๆ กัน

การเลือกระดับ cross-linking ของแป้งแปรสภาพไปใช้ในผลิตภัณฑ์ ขึ้นกับลักษณะเนื้อของอาหารที่ต้องการ สภาวะความเป็นกรด ระดับน้ำตาลที่มีอยู่ อุณหภูมิในการเตรียมและในกระบวนการผลิตอาหารนั้น โดยทั่วไปอาหารที่มีสภาพเป็นกลางหรือกรดอ่อน จะใช้แป้งที่มีระดับการ cross-linking ต่ำ แต่ในอาหารที่มีสภาพเป็นกรดมากขึ้นต้องใช้แป้งที่มีระดับการ cross-linking สูงขึ้น และอาหารที่ต้องผ่านกระบวนการผลิตที่รุนแรงอาจต้องใช้แป้งที่มี

ระดับการ cross-linking สูงมาก นอกจากนี้การเลือกแป้งที่มีระดับการ cross-linking เหมาะสมสามารถหน่วงเหนี่ยวการเกิด gelatinization เพื่อให้แป้งมีความหนืดต่ำระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิในระยะต้น ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนสะดวกขึ้น แต่ในระยะต่อมาที่อุณหภูมิสูง แป้งจะขึ้นและมีความต้านทานต่อการสลายตัว ทำให้อาหารนั้นมีความหนืดสูงกว่าการใช้แป้งที่ไม่ได้แปรสภาพ (9)

2.5.1 ซอสมะเขือเทศ

ซอสมะเขือเทศ (tomato ketchup, catsup, sauce) หมายถึง อาหารที่เตรียมขึ้นจากมะเขือเทศหรือมะเขือเทศเข้มข้น (tomato paste) น้ำตาล น้ำส้มสายชู เกลือ และเครื่องเทศเป็นส่วนประกอบสำคัญ และอาจมีการเติมสารทำให้ข้น และ เจือสี (33) ตามประกาศของกระทรวงสาธารณสุขของประเทศไทยฉบับที่ 42 (2522) ได้กำหนดมาตรฐานของซอสมะเขือเทศให้มีความเป็นกรดคำนวณเป็นกรดอะซิติกไม่เกินร้อยละ 7 ของน้ำหนัก และมีปริมาณสารทั้งหมด (total solid) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 20 ของน้ำหนัก

สารทำให้ข้นที่ใช้ในการผลิตซอสมะเขือเทศ มีหน้าที่ป้องกันการแยกชั้นของซอส เนื่องจากการผลิตซอสต้องใช้เครื่องปรุงหลายอย่างจึงเกิดการแยกชั้นได้ง่าย ซึ่งมีสาเหตุมาจากธรรมชาติของวัตถุดิบที่ใช้ มีความหนืดต่ำหรือความหนืดนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยถูกทำให้เสื่อมสภาพลง โดยการหุงต้มที่ไม่ถูกต้อง เช่น ใช้ไฟแรงและหุงต้มนาน หรือเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีของกรด สารทำให้ข้นนี้ได้แก่ พวกกัม (gum) เช่น กัมคารายา กัมทรากาคานท์ เพคติน สารพวกเซลลูโลสหรืออาจใช้แป้งสาลี แป้งข้าวโพด แป้งมัน แต่แป้งพวกนี้จะสลายตัวได้ง่าย (34)

การผลิตซอสมะเขือเทศมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้ (33)

1. ผสมสารทำให้ข้นในน้ำส้มสายชูก่อนนำไปใช้
2. ผสมมะเขือเทศเข้มข้น น้ำ น้ำตาล และ เกลือในหม้อต้ม แล้วให้ความร้อน
3. เติมสารให้กลิ่น (flavour) และเครื่องเทศลงไป
4. เติมส่วนผสมของสารทำให้ข้นและน้ำส้มสายชู กวนให้เข้ากัน หยุดให้ความร้อนทันที
5. บรรจุลงในขวดขณะร้อน

เนื่องจากซอสมะเขือเทศประกอบด้วยส่วนที่เป็นสารละลายข้น (thick syrup) และ

เส้นใยของมะเขือเทศ (tomato fiber) สัดส่วนระหว่างสารละลายลายกับเส้นใยมะเขือเทศ และคุณลักษณะของสารละลายนี้เป็นปัจจัยสำคัญต่อ เสถียรภาพของซอสมะเขือเทศ ปริมาณเพคติน-จากมะเขือเทศที่ละลายออกมาทำให้ซอสมีความหนืด มีลักษณะข้น (body) ซึ่งการตรวจสอบความหนืดของซอสมะเขือเทศสามารถทำได้โดยใช้เครื่องวัดดังนี้ (35)

1. Bostwick consistometer ใช้ในการตรวจสอบความหนืดโดยหาระยะทางที่สารสามารถไหลไปได้ไปตามพื้นระดับในระยะเวลาที่กำหนด
2. Brookfield viscometer ใช้ในการควบคุมความหนืดของซอสมะเขือเทศ ซึ่งสามารถวัดได้ทั้งขณะร้อนและเย็น เนื่องจากซอสมะเขือเทศเป็นสารแบบ plastic ขณะร้อน และเป็นแบบ thixotropic ขณะเย็น จึงสามารถวัดความหนืดที่แตกต่างกันได้โดยการปรับความเร็วรอบและชนิดของ spindle ที่ใช้
3. Adams consistometer มีหลักการเช่นเดียวกับ Bostwick consistometer

ในงานวิจัยนี้ เลือกวัดความหนืดของซอสมะเขือเทศด้วยเครื่องวัด Brookfield viscometer เพราะเป็นเครื่องมือที่สามารถหาได้

2.5.2 วุ้นเส้น

วุ้นเส้นเป็นอาหารแห้งทำจากส่วนที่เป็นแป้งของถั่วเขียว มีลักษณะเป็นเส้นยาวใส ไม่มีสี และมีองค์ประกอบสำคัญ คือ ความชื้นร้อยละ 15.7 และคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 82.9 (7, 36)

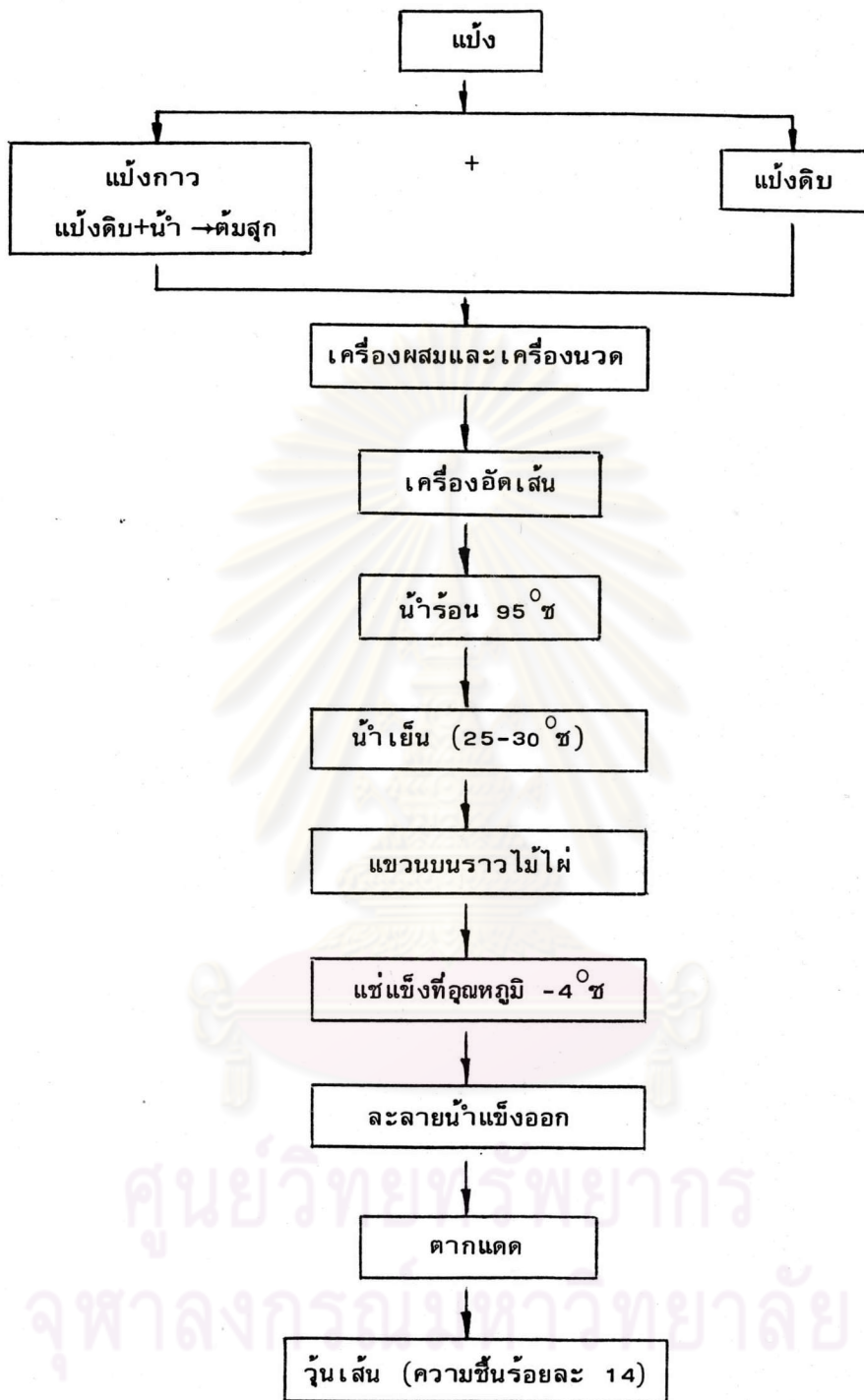
แป้งถั่วเขียวประกอบด้วยอะไมโลสร้อยละ 19.5 (37) ซึ่งเป็นปริมาณที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับของถั่วชนิดอื่น ๆ มีลักษณะกราฟของความหนืดแบบผสม คือ เมื่อความเข้มข้นของน้ำแป้งต่ำ (ร้อยละ 4-7) จะเป็นแบบซี และเมื่อความเข้มข้นของน้ำแป้งสูงขึ้น (ร้อยละ 8) จะเป็นแบบบี (21)

Lii และ Chang (1981) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะของแป้งจากถั่วต่าง ๆ กับคุณภาพของวุ้นเส้น พบว่า แป้งที่เหมาะสมในการทำวุ้นเส้นควรมีปริมาณอะไมโลสประมาณร้อยละ 20 หรือมีค่า iodine affinity สูง (ประมาณร้อยละ 6-7) และมีลักษณะกราฟของความหนืดวัดด้วยเครื่อง Brabender-Visco Amylograph เป็นแบบซี ซึ่งเป็นลักษณะ

ของแป้งถั่วเขียว ดังนั้น ถ้านำแป้งชนิดอื่นที่มีสมบัติต่าง ๆ ใกล้เคียงกับของแป้งถั่วเขียวมาทำวันเส้นหรือทดแทนบางส่วนของแป้งถั่วเขียวในการทำวันเส้น วันเส้นที่ได้ควรมีคุณภาพใกล้เคียงกับวันเส้นที่ทำจากแป้งถั่วเขียวล้วน เช่นเดียวกัน สำหรับแป้งมันสำปะหลัง แม้จะมีปริมาณอะไมโลสต่ำกว่าของแป้งถั่วเขียว และลักษณะกราฟของความหนืดเป็นแบบเอ แต่การแปรสภาพทางเคมีโดยการ cross-linking สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในเม็ดแป้งทำให้ paste จากแป้งมันสำปะหลังแปรสภาพมีลักษณะกราฟของความหนืดเป็นแบบซี เช่นเดียวกับของแป้งถั่วเขียว ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการนำแป้งมันสำปะหลังแปรสภาพมาทดแทนบางส่วนของแป้งถั่วเขียวในการทำวันเส้น เพื่อลดต้นทุนการผลิต โดยคุณภาพของวันเส้นที่ได้ควรใกล้เคียงกับวันเส้นที่ทำจากแป้งถั่วเขียวล้วนเช่นกัน

การผลิตวันเส้นมีขั้นตอนที่สำคัญแสดงในรูปที่ 2.7 ดังรายละเอียดต่อไปนี้ (36)

1. การเตรียมแป้ง แป้งที่ใช้ทำวันเส้นอาจใช้แป้งถั่วเขียวล้วน ๆ หรือใช้แป้งถั่วเขียวผสมกับแป้งอื่น ๆ ก็ได้เพื่อลดต้นทุนการผลิต แต่วันเส้นที่มีคุณภาพดีจะทำมาจากแป้งถั่วเขียวล้วน การเตรียมแป้งนี้จะแบ่งแป้งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนหนึ่งใช้เป็นแป้งกาว และอีกส่วนหนึ่งใช้เป็นแป้งดิบ ส่วนที่เป็นแป้งกาวจะใช้แป้งดิบผสมน้ำแล้วต้มโดยการกวนให้แป้งสุกและใส ซึ่งจะมีความเหนียวและเป็นส่วนที่มีความสำคัญต่อการนวดแป้งให้เข้ากับแป้งดิบ เพื่อให้แป้งดิบจับตัวกัน เป็นก้อนเดียวกัน
2. การผสมและการนวดแป้ง ผสมแป้งดิบและแป้งกาวให้เข้ากันด้วยเครื่องผสม แล้วนวดต่อในเครื่องนวดเพื่อให้แป้งมีความเหนียวเป็นเนื้อเดียวกัน ระหว่างการนวดแป้งด้วยเครื่องนวดจะใช้แรงงานคนช่วยนวดด้วย เพื่อให้การนวดมีประสิทธิภาพมากขึ้น แป้งที่นวดได้ที่แล้วจะสังเกตเห็นได้ว่า มีลักษณะเนื้อเหนียวเป็นมันวาว มีความหนืดพอนั้น เป็นก้อนได้เพียงชั่วขณะ หลังจากนั้นจะเหลวและไหลเป็นเส้นแป้งได้
3. การทำเส้น แป้งที่ผ่านการนวดได้ที่แล้วจะถูกแบ่งออกโดยปั้นตะล่อมให้เป็นก้อน แล้วนำไปใส่ในกะบะสแตนเลสสำหรับทำเส้น เส้นแป้งจะไหลผ่านรูลงสู่กะทะน้ำร้อนที่มีการควบคุมอุณหภูมิประมาณ 95°C เมื่อเส้นแป้งสุกจะลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำแล้วจึงสาวหรือเขี่ยเส้นแป้งให้ลอยผ่านลงสู่อ่างน้ำเย็นซึ่งเชื่อมด้วยรางต่อกัน 2 อ่าง เส้นแป้งที่ผ่านน้ำสุดท้ายจะถูกสาวขึ้นพาดบนราวไม้ไผ่ที่เตรียมไว้หลาย ๆ รอบ ตัดเส้นให้ขาดเมื่อพันจนเต็มราวไม้แล้วเขย่าในน้ำหลาย ๆ ครั้ง เพื่อป้องกันไม่ให้เส้นแป้งติดกัน ปล่อยทิ้งไว้จนสะเด็ดน้ำ แล้วนำไปแช่แข็งในชั้นต่อไป



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการผลิต้วนเส้น

4. การแช่แข็ง วุ้นเส้นที่ได้ต้องนำไปแช่แข็งก่อนนำไปตากแดด ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เส้นติดกันในขณะที่วุ้นเส้นแห้ง ใช้อุณหภูมิของการแช่แข็งประมาณ -4°C เป็นเวลานาน 6 ชั่วโมง เมื่อนำวุ้นเส้นมาทำการละลายเพื่อให้น้ำแข็งละลาย วุ้นเส้นจะมีความกระด้างและแข็งขึ้น ซึ่งจะคลี่ออกจากกันได้โดยง่ายในขณะนำไปตากแห้ง วิธีการละลาย ทำได้โดยแช่วุ้นเส้นในสารละลายกรดซัลฟูริก (pH ประมาณ 6) นาน 1 ชั่วโมง เพื่อช่วยในการฟอกสีของวุ้นเส้นให้ขาวขึ้นอีก และนำไปล้างน้ำแล้วจึงนำไปตากแห้งในขั้นต่อไป

5. การทำแห้ง โรงงานทั่วไปใช้วิธีทำแห้งด้วยการตากแดดโดยการตากวุ้นเส้นบนรางลวดหรือราวไม้ไผ่ โดยใช้แดดจัด ๆ ใช้เวลาประมาณ 6 - 8 ชั่วโมง จึงจะแห้งพอดี และวุ้นเส้นจะมีความชื้นประมาณร้อยละ 14



ศูนย์วิทยพัทยาการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย