



บทที่ 2

## วารสารปริทัศน์

### 2.1 แป้งข้าวเจ้า (rice flour)

แป้งข้าวเจ้า หมายถึง แป้งที่ได้จากข้าวขาวซึ่งเป็นข้าวเต็มเมล็ด ข้าวหักใหญ่ ข้าวหักหรือปลายข้าว ที่ได้จากการสีข้าวเปลือกเจ้าของพืชที่มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า ออไรซา ซาไตวา แอล. (Oryza sativa L.) (2) แต่ส่วนใหญ่ได้จากข้าวหักหรือปลายข้าว

#### 2.1.1 กระบวนการผลิต

1. แยกสิ่งสกปรกโดยแยกพวกเศษหิน ดิน ทราย ที่ติดมาด้วยเครื่อง
2. แช่ข้าว อาจแช่ข้าวในน้ำที่เติมสารพวกด่าง เช่น โซดาไฟ หรือ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดโปรตีน ทั้งนี้ เพราะโปรตีนในข้าวละลายในน้ำได้น้อยมาก แต่ละลายในด่างได้ดี ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือสตาร์ช (starch) สำหรับแป้งข้าวเจ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นแป้ง (flour) ที่ไม่ผ่านการแช่ในด่าง แต่แช่ในน้ำและมีการเติมสารฟอกสีหรือสารกันเสียพวกโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (3)
3. บดให้ละเอียด บดด้วยไม้หินหรือ hammer mill อาจบดเปียกคือ มีน้ำผสมอยู่ หรือบดแห้ง
4. ออบแห้งและบรรจุ หลังจากอบแห้งแล้ว นำมาผ่านตะแกรงร่อนที่มีขนาด 180 ไมครอน

#### 2.2 คุณสมบัติทั่วไปของแป้ง

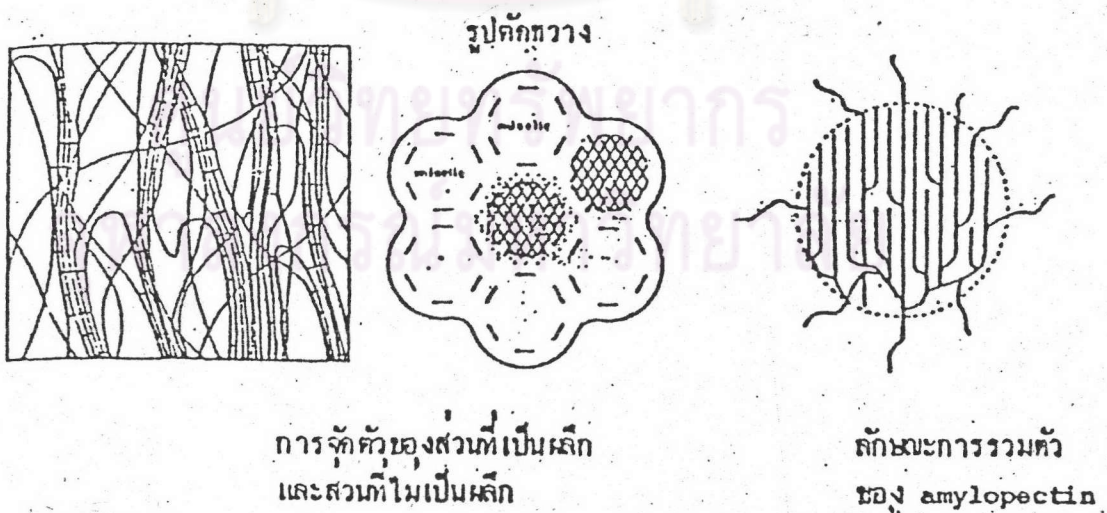
แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรต ซึ่งเป็นโพลิเมอร์ของ  $\alpha$ -D-glucose ประกอบด้วย อะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพคติน (amylopectin)

อะไมโลสเป็นโพลิเมอร์แบบสายตรงที่หน่วยกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -D-(1,4) glucosidic มีหน่วยกลูโคส (anhydroglucose units ,AGU) ประมาณ 200-2,000 หน่วย

ส่วนอะไมโลเพคติน เป็นโพลิเมอร์ที่แตกเป็นสาขาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -D-(1,6) glucosidic แต่ละสาขาประกอบด้วยหน่วยกลูโคสประมาณ 15-25 หน่วย (4,5) จุดที่แตกตัวเป็นกิ่งนั้นอาจอยู่ใกล้กันมากประมาณ 8-9 หน่วย (6) แบ่งทั่วไปมีอะไมโลสประมาณร้อยละ 20-30 ของน้ำหนัก

### 2.2.1 โครงสร้างของเม็ดแป้ง

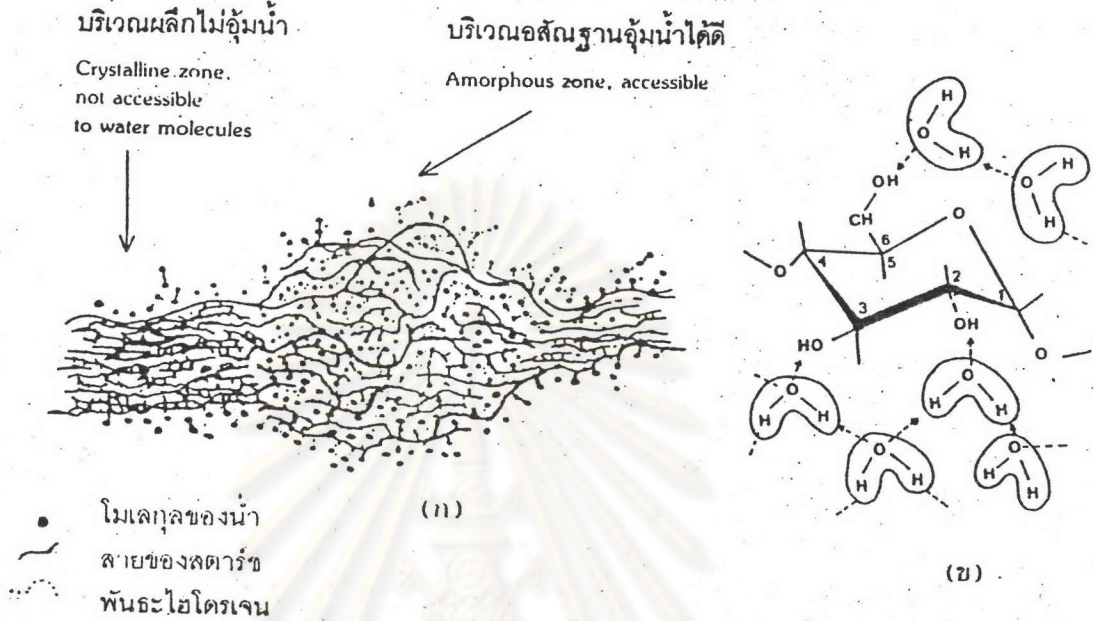
จากการศึกษาโดยใช้ light microscope สรุปได้ว่าโมเลกุลของอะไมโลส และอะไมโลเพคตินภายในเม็ดแป้ง มีการจัดตัวกันเป็นกลุ่ม แต่ละกลุ่มมีการจัดเรียงตัวเป็น 2 ลักษณะ คือ จัดเป็นลักษณะคล้ายผลึก เรียกว่า crystalline region หรือ trichite เป็นส่วนที่มีการจัดเรียงตัวอย่างมีระเบียบ โดยเริ่มจากรอยบุ่มของเม็ดแป้งแล้วกระจายออกเป็นรัศมีโดยรอบ ประกอบด้วยอะไมโลสเป็นส่วนใหญ่ โดยอยู่ตามความยาวของส่วนที่เป็นเส้นตรงของอะไมโลเพคติน (ปลายกิ่ง) ทำให้ส่วนนี้มีความหนาแน่นมากกว่าส่วนอื่น ๆ จนสะท้อนแสงได้ มีลักษณะเป็นเส้นเงาดำคาดเม็ดแป้ง คล้ายรูปกากบาท เรียกว่า birefringence ซึ่งมีส่วนตัดอยู่ที่ รอยบุ่มของเม็ดแป้ง (hilum) ส่วนนี้มีการงอตัวจำกัด เนื้อค่อนข้างแข็ง ไม่ค่อยมีปฏิกิริยากับสารอื่นมากนัก และเป็นส่วนที่หักแสง เอ็กซ์เรย์ ส่วนของผลึกมีประมาณร้อยละ 60 ของพื้นที่ทั้งหมด โดยมีขนาดตั้งแต่ 10-30 ไมครอน แตกต่างกันตามชนิดของพืช เม็ดแป้งที่มีปริมาณอะไมโลส หรืออะไมโลเพคตินใกล้เคียงกัน อาจเป็นส่วนที่เป็นผลึกไม่เท่ากัน (6) อีกส่วนหนึ่งมีการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ คือน้ำได้ตีกว่าบริเวณผลึก ไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี เรียกว่า amorphous region ซึ่งอยู่รอบๆผลึก (6) ดังรูป 1



รูปที่ 1 การจัดตัวของส่วนที่เป็นผลึก (crystalline region) และส่วนที่ไม่เป็นผลึก (amorphous region) ของเม็ดแป้ง (6)



กลุโคส 1 หน่วยในบริเวณ amorphous สามารถอุ้มน้ำได้ถึง 6 โมเลกุล ดังรูป 2



รูปที่ 2 ความสามารถในการอุ้มน้ำของส่วนที่เป็นผลึกและ amorphous zone (7)

แป้งแต่ละชนิด มีการเรียงตัวของผลึกในเม็ดแป้งแตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อเกิดการสุกของแป้ง (gelatinization) จะมีรูปแบบการพองตัวและความหนืดแตกต่างกัน (8)

2.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง

แป้งประกอบด้วยคาร์บอน ร้อยละ 44.40 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.20 และออกซิเจนร้อยละ 49.40 ของน้ำหนักโมเลกุล โดยส่วนใหญ่อยู่ในรูป  $\alpha$ -D-glucose นอกจากนี้จะเป็นโปรตีน ไขมัน pentosan ฟอสฟอรัส และเถ้า ดังตารางที่ 1 (4,9) ฟอสฟอรัสที่อยู่ในเม็ดแป้งข้าวโพด ข้าวสาลีและข้าวเจ้า มีประมาณร้อยละ 0.01-0.02 แป้งอื่นๆ จะมีฟอสฟอรัสอยู่ในรูป glycerol monophosphate ได้แก่ แป้งจากมันฝรั่ง มันสำปะหลัง สาคุ และ arrow root โดยอยู่ในส่วนของอะไมโลเพคติน ซึ่งเกิดพันธะแบบ phosphate esterified ที่ตำแหน่งคาร์บอนตัวที่ 6 (10,11)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งชนิดต่าง ๆ (9)

ชนิดของแป้ง	โปรตีน (ร้อยละ)	ไขมัน (ร้อยละ)	คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ)	เส้นใย (ร้อยละ)	เถ้า (ร้อยละ)	ความชื้น (ร้อยละ)
ข้าวเจ้า	6.64	0.65	81.93	0.39	0.51	9.88
ข้าวสาลี	14.20	0.90	-	-	0.42	-
ข้าวฟ่าง	8.45	5.68	75.41	2.14	2.24	6.08
ข้าวเหนียว	7.33	1.37	81.02	0.41	0.12	9.57
ถั่วเขียว	5.20	0.36	82.05	0.31	0.26	11.82

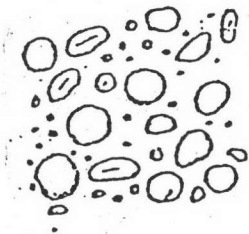
แป้งแต่ละชนิดมีลักษณะสำคัญทางกายภาพและเคมี เช่น ลักษณะของขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้ง อุณหภูมิแป้งสุก (gelatinization temperature) กำลังการพองตัว (swelling power) การคืนตัว (retrogradation) และความหนืดของ paste แตกต่างกัน ซึ่งทำให้แป้งแต่ละชนิดมีความเหมาะสมในการใช้งานต่างกัน (12)

### 2.2.3 ลักษณะสำคัญทางกายภาพและเคมี

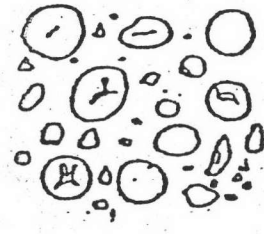
#### 2.2.3.1 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้ง (size and shape of granule)

เม็ดแป้งทั่วไปมีขนาดตั้งแต่ 2-100 ไมครอน มีรูปร่างต่างกัน เช่น กลม รูปไข่ และอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3 (5,6) เม็ดแป้งข้าวเจ้ามีขนาดเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับเม็ดแป้งอื่น ๆ คือมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-5 ไมครอน รูปร่างหลายเหลี่ยม เรียกว่า polygonal shape โดยเกาะกันเป็นกลุ่ม (12,13) ส่วนเม็ดแป้งสาลีมีลักษณะกลมและรีเล็กน้อย มี 2 ขนาดคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-10 ไมครอน (small spherical) และขนาด 20-35 ไมครอน (large lentil shape) สำหรับแป้งอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 3

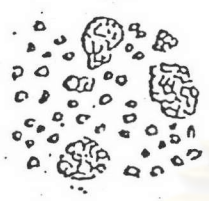




Wheat starch x 125



Rye starch x 125



Rice starch x 125



Maize starch x 125

รูปที่ 3 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ (6)

2.2.3.2 อัตราส่วนอะไมโลสต่ออะไมโลเพคติน

อะไมโลสไม่ละลายในน้ำเย็น แต่เมื่อได้รับความร้อน การละลายจะดีขึ้นสามารถคุดน้ำได้ประมาณ 4 เท่าของน้ำหนัก ทำให้ได้ของเหลวที่มีลักษณะเหนียวหนืด เมื่อทิ้งให้เย็นจะจับตัวเกิดเป็นเจลได้ แต่อะไมโลเพคตินสามารถละลายได้ในน้ำเย็น ถ้าพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลหรือนั่นระหว่างโมเลกุลอื่นๆถูกทำลาย และเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดเป็น paste ที่มีลักษณะใสและมีความหนืดสูงกว่าอะไมโลส เมื่อทิ้งให้เย็นจะไม่สามารถจับตัวกันเกิดเป็นเจลได้เหมือนอะไมโลส (6) อัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพคตินมีผลต่อสมบัติด้านต่างๆ ของแป้ง โดยมีผลต่อการงอตัวของเม็ดแป้ง ความใสและความหนืดของ paste แป้งที่มีอะไมโลสสูงจะคุดน้ำ และมีการงอตัวของเม็ดแป้งข้าง จึงต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าปกติเพื่อให้เกิดการงอตัวของเม็ดแป้งอย่างสมบูรณ์ (5) แต่ถ้ามีอะไมโลสในปริมาณที่สูงมาก เมื่อต้มในน้ำเดือด เม็ดแป้งคุดน้ำได้น้อยเกินไปจนไม่สามารถงอตัวจนแตกออก ทำให้อะไมโลสไม่สามารถหลุดออกจากเม็ดแป้งได้ ดังนั้น เมื่อทิ้งไว้ให้เย็นจะไม่เกิดเป็นเจล เช่น แป้งข้าวเจ้าที่มีอะไมโลสสูงกว่าร้อยละ 33 แต่แป้งข้าวเจ้าที่มีอะไมโลสประมาณร้อยละ 27-33 จะให้เจลที่มีลักษณะเหนียวหนืดดี เหมาะสำหรับการทำกวยเตี๋ยวหรือเส้นหมี่ และถ้าอะไมโลสต่ำเกินไปแต่มีอะไมโลเพคตินสูง เช่น แป้งข้าวเหนียว เมื่อ paste เย็นตัวลง จะไม่สามารถเกิดเป็นเจลได้เช่นกัน (6)

นอกจากนี้อัตราส่วนอะไมโลสต่ออะไมโลเพคติน ยังมีผลต่อเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ (14) เช่นในผลิตภัณฑ์แป้งชูบทอด ถ้ามีปริมาณอะไมโลสสูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าปริมาตรจำเพาะ (specific volume) ต่ำลง หรือการพองตัว (puffing) ของผลิตภัณฑ์ลดลง แต่จะเกิดเป็นฟิล์มที่แข็งแรงซึ่งทำให้ความกรอบของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้ามีอะไมโลเพคตินสูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีการพองตัวดี แต่ฟิล์มที่เกิดขึ้นมีลักษณะเปราะและแตกง่ายไม่แข็งแรงเท่าฟิล์มที่เกิดจากอะไมโลส (15)

สำหรับข้าวพันธุ์ต่างๆ ที่ได้รับการส่งเสริมให้มีการปลูกภายในประเทศ สามารถแบ่งตามปริมาณอะไมโลสได้ 3 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีอะไมโลสต่ำ ได้แก่ พันธุ์ กข 15 และ 21 (อะไมโลสประมาณร้อยละ 16.40 และ 18.85 ตามลำดับ) กลุ่มที่มีอะไมโลสค่อนข้างสูง ได้แก่ พันธุ์ กข7 และ 23 (อะไมโลสประมาณร้อยละ 27.05 และ 27.00 ตามลำดับ) กลุ่มที่มีอะไมโลสสูง ได้แก่ พันธุ์ กข5 และ 25 (อะไมโลสประมาณร้อยละ 31.50 และ 30.95 ตามลำดับ) (16)

อัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพคตินของแป้งแตกต่างกัน ขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น พันธุ์ข้าว และฤดูที่ปลูก เป็นต้น (17)

#### 2.2.4 การสุกของแป้ง (gelatinization)

เม็ดแป้งแต่ละชนิดสามารถดูดน้ำเข้าได้ในปริมาณจำกัด เนื่องจากน้ำอาจซึมผ่านเข้าไปในส่วนที่เป็น amorphous ของเม็ดแป้งได้บ้างจึงเกิดการพองตัวเพียงเล็กน้อยซึ่งสังเกตได้ยาก เช่น เม็ดแป้งสาลีที่พองตัวในน้ำเย็นมีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 10 เท่านั้น ปรากฏการณ์นี้สามารถผันกลับได้ คือ เมื่อนำแป้งไปทำให้แห้ง ก็จะมีลักษณะและสมบัติเหมือนเดิม เนื่องจากมีการจับกันอย่างแข็งแรงด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในส่วนที่เป็นผลึก (6) แต่เมื่อได้รับความร้อนจนมีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้พันธะไฮโดรเจนแตกออกจากกัน ทำให้การจับกันระหว่างโมเลกุลแป้งในส่วนผลึกคลายตัวลง น้ำสามารถเข้าไปในโมเลกุลของเม็ดแป้งได้ (18) และเนื่องจากโมเลกุลภายในเม็ดแป้งมีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) จำนวนมาก รวมทั้งมีความสามารถรวมกับน้ำ (hydrophilic) ได้ดี (8) จึงทำให้เม็ดแป้งดูดน้ำและเกิดการพองตัวซึ่งไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible) กระบวนการนี้เรียกว่า การสุกของแป้ง (gelatinization) (6,8) ซึ่งเริ่มจากเกิดช่องว่างขึ้นที่รอยบุ่มของเม็ดแป้งในระยะแรก ต่อมาช่องว่างจะขยายใหญ่ขึ้นจนในที่สุดเม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ ทำให้สูญเสียลักษณะ birefringence ซึ่งเป็นลักษณะที่บอกถึงการ



จัดเรียงตัวของโมเลกุลอย่างมีระเบียบภายในเม็ดแป้ง เม็ดแป้งที่หนองตัวอย่างเต็มที่มีลักษณะเหมือนถุงใส เมื่อได้รับความร้อนต่อไปอีกจะทำให้เม็ดแป้งแตกออก (6) ปัจจัยที่ควบคุมการพองตัวของเม็ดแป้ง คือ แรงยึดระหว่างพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุล สำหรับช่วงอุณหภูมิที่เม็ดแป้งมีการดูดน้ำอย่างรวดเร็ว และพองตัวขึ้นมากเรียกว่า อุณหภูมิแป้งสุก (gelatinization temperature) แป้งแต่ละชนิดมีอุณหภูมิแป้งสุกแตกต่างกัน เช่น แป้งข้าวเจ้า มีอุณหภูมิแป้งสุกในช่วง 68-78°C ส่วนแป้งสาลีอยู่ในช่วง 58-64°C (13) สำหรับแป้งชนิดอื่นๆ แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมบัติของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ (ค่าโดยประมาณ) (4)

ชนิดของแป้ง (Starch)	ขนาด (mu) (Granule Size)	ลักษณะรูปร่าง (Granule Shape)	อะไมโลส (%)	อุณหภูมิแป้งสุก (°C) (5% Solution)
Corn	20	Round, Polygonal	25	80
Waxy Corns	20	Round, Polygonal	0-3	74
Potato	35	Oval	20	64
Tapioca	18	Truncated, round, Oval	17	63
Sago	25	Oval, truncated	27	74

### 2.2.5 การเกิดเจล (gel formation)

เมื่อน้ำแป้งได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิแป้งสุก เม็ดแป้งจะแตกออก อะไมโลสแยกตัวออกจากอะไมโลเพคติน และหลุดออกจากเม็ดแป้งมาสู่สารละลาย (6, 19) ทำให้น้ำแป้งมีลักษณะเป็น paste ที่มีความข้นหนืดและใสขึ้น (6, 8) เมื่อปล่อยให้เย็นลง paste อาจยังคงเป็นสารละลายที่มีความข้นหนืด (sols) หรือเปลี่ยนเป็นเจล ขึ้นกับความเข้มข้นของน้ำแป้ง ถ้าน้ำแป้งมีความเข้มข้นต่ำมาก paste ที่ได้ยังคงมีลักษณะเป็นสารละลายที่มีความข้นหนืดอยู่ต่อไป แต่ถ้าน้ำแป้งมีความเข้มข้นสูง โมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจะจับตัวกัน 3 ทิศทาง ทำให้เกิดโครงสร้างสามมิติหรือเจลขึ้น โมเลกุลอะไมโลสมีความสำคัญในการจับตัวกันเพื่อเกิดเป็นเจล เนื่องจากโมเลกุลมีลักษณะเป็นเส้นตรงสามารถเข้าไปจับกับโมเลกุลอะไมโลเพคตินได้ ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลจำนวนมาก โดยเฉพาะในขณะที่ paste เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดเจลซึ่งมีความหนืดสูงขึ้น แต่ถ้า paste เย็นตัวลงอย่างช้าๆ โมเลกุลของอะไมโลสอาจเข้าจับกับอะไมโลเพคติน หรือ เคลื่อนที่เข้าจับตัวกันเอง ทำให้เกิดเป็นผลึกขึ้นมา

ความหนืดของเจลขึ้นอยู่กับปริมาณการแตกตัวของเม็ดแป้ง และเวลาที่ปล่อยให้ทิ้งไว้ถ้าเม็ดแป้งมีการแตกตัวมาก เจลที่ได้จะมีความหนืดมาก ในทางตรงกันข้าม ถ้าเม็ดแป้งแตกตัวน้อย จะได้เจลที่มีลักษณะนุ่ม สำหรับเวลาที่ปล่อยให้ทิ้งไว้สั้น ถ้าเป็นเวลานานทำให้มีการจับตัวกันมากขึ้น เจลจะมีลักษณะแข็งขึ้น (6)

### 2.2.6 การคืนตัว (retrogradation) ของแป้ง

การคืนตัวของแป้ง เป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุลอะไมโลสสามารถจับตัวกันใหม่หรือจับกับอะไมโลเพคตินด้วยพันธะไฮโดรเจน ในขณะที่ paste แป้งเย็นลง มีผลทำให้สูญเสียโมเลกุลน้ำที่เคยจับอยู่กับอะไมโลสและอะไมโลเพคตินบางส่วน เกิดเป็นโครงสร้างสามมิติที่สามารถอุ้มน้ำไว้ได้ มีผลทำให้ความหนืดของ paste สูงขึ้นอีกครั้งหนึ่ง (20) ถ้า paste เกิดการคืนตัวมาก จนกระทั่งน้ำที่เคยจับตัวกับอะไมโลสและอะไมโลเพคตินแยกตัวออกมา ปรากฏให้เห็นเป็นหยดน้ำ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า เกิดการแยกตัวของน้ำ (6)

#### 2.2.6.1 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดการคืนตัว

การเกิดการคืนตัวอย่างช้าๆ เป็นการจับตัวของอะไมโลส เพื่อให้เกิดผลึกขึ้น ซึ่งเกิดเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้



- ก. โมเลกุลอะไมโลส ยึดตัวออก เนื่องจากพันธะที่จับกันแตกตัว
- ข. น้ำส่วนที่เรียกว่า bound water หลุดออกไปจากโมเลกุล
- ค. เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล

#### 2.2.6.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการคินตัว

##### 2.2.6.2.1 ขนาดโมเลกุลของอะไมโลส อัตราการเกิด

การคินตัวจะมีค่าสูงสุดเมื่อโมเลกุลอะไมโลสมีขนาดปานกลาง ถ้ามีขนาดใหญ่การเคลื่อนไหวช้า ทำให้รวมตัวกันได้ยากกว่า ขณะที่โมเลกุลเล็กๆ มีการเคลื่อนที่แบบ brownian ซึ่งไม่เป็นระเบียบ ทำให้เกิดการรวมตัวได้ยากเช่นกัน (21)

##### 2.2.6.2.2 อุณหภูมิ การเกิดการคินตัวเกิดเร็วที่อุณหภูมิ $-4^{\circ}\text{C}$

ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิต่ำทำให้โมเลกุลอะไมโลสที่มีขนาดเล็กเคลื่อนที่ได้ช้าลง ดังนั้นอะไมโลสจึงจับตัวกันเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ได้ดีขึ้น (6)

##### 2.2.6.2.3 กรดหรือด่าง กรดบางชนิด เช่น กรดกำมะถัน

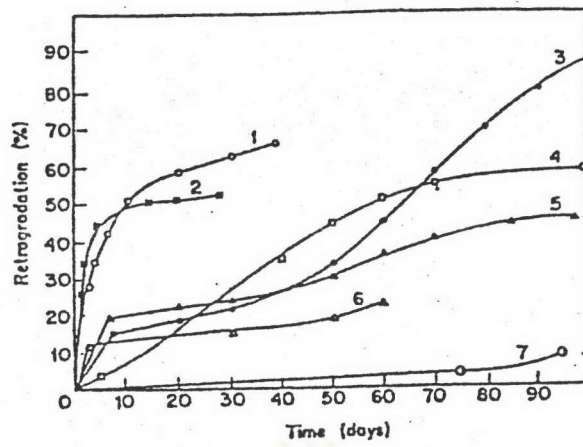
หรือกรดเกลือมีผลทำให้เกิดการคินตัวเร็วขึ้นที่ pH 2 จะเกิดการคินตัวเร็วกว่าที่ pH 6 ประมาณ 4 เท่า ส่วนด่างทำให้เกิดการคินตัวช้าลง เนื่องจากทำให้โมเลกุลของอะไมโลสแตกตัว (21)

##### 2.2.6.2.4 สารอินทรีย์ สารอินทรีย์บางชนิดมีผลต่อการคินตัวมาก

ซึ่งอาจทำให้เกิดการคินตัวเร็วขึ้นหรือช้าลง สารอินทรีย์ที่ทำให้เม็ดแป้งของตัวได้ง่าย จะป้องกันการคินตัวได้ดี แต่สารอินทรีย์ที่ป้องกันการพองตัวของเม็ดแป้งช่วยให้เกิดการคินตัวเร็วขึ้น (6)

##### การศึกษาอัตราการเกิดการคินตัวของแป้งชนิดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4

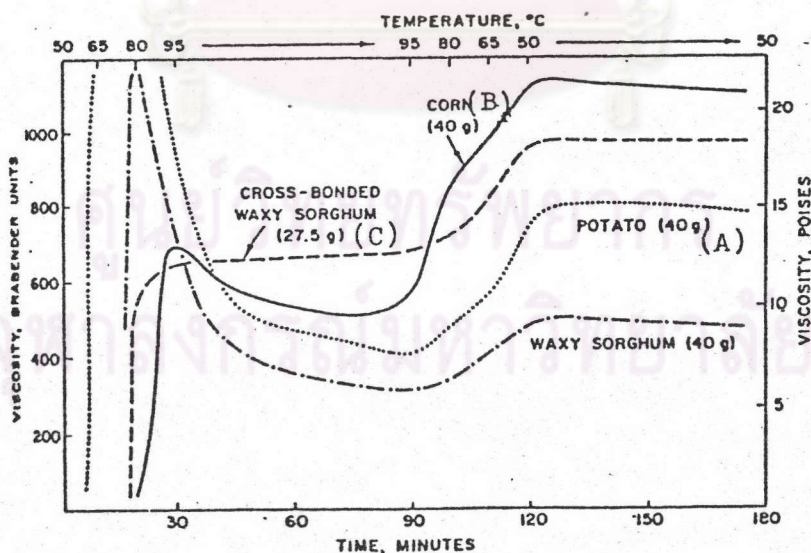
(21) เส้นกราฟแสดงให้เห็นถึง การตกตะกอนจากน้ำแป้งร้อยละ 2 ที่  $0.2^{\circ}\text{C}$  พบว่า แป้งจากธัญพืช เกิดการคินตัวเร็วกว่าแป้งจากพืชจำพวกหัว เนื่องจากมีปริมาณอะไมโลสสูง และโมเลกุลของอะไมโลสมีขนาดเหมาะสม จึงรวมตัวกันได้ง่ายและตกตะกอนอย่างรวดเร็ว (22,23) ส่วนแป้ง waxy ซึ่งประกอบด้วยอะไมโลเพคตินเกือบร้อยละ 100 เกิดการคินตัวได้ช้ามากเพราะโมเลกุลมีขนาดใหญ่ และแตกเป็นสาขามาก (23)



รูปที่ 4 อัตราการเกิดการคืนตัวของแป้งชนิดต่างๆ ความเข้มข้นของน้ำแป้งร้อยละ 2 ที่อุณหภูมิ 0.2°C

1. แป้งข้าวโพด 2. แป้งสาลี 3. แป้งมันฝรั่ง 4. แป้งมันเทศ  
 5. arrow root 6. แป้งมันสำปะหลัง 7. waxy corn starch

ในการศึกษาการพองตัว การเกิดเจล และการคืนตัวของแป้งชนิดต่างๆ อาจทำได้ โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำแป้งเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ จากการวัดด้วยเครื่อง Brabender Visco-Amylograph ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความหนืดของน้ำแป้งที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ ดังรูปที่ 5

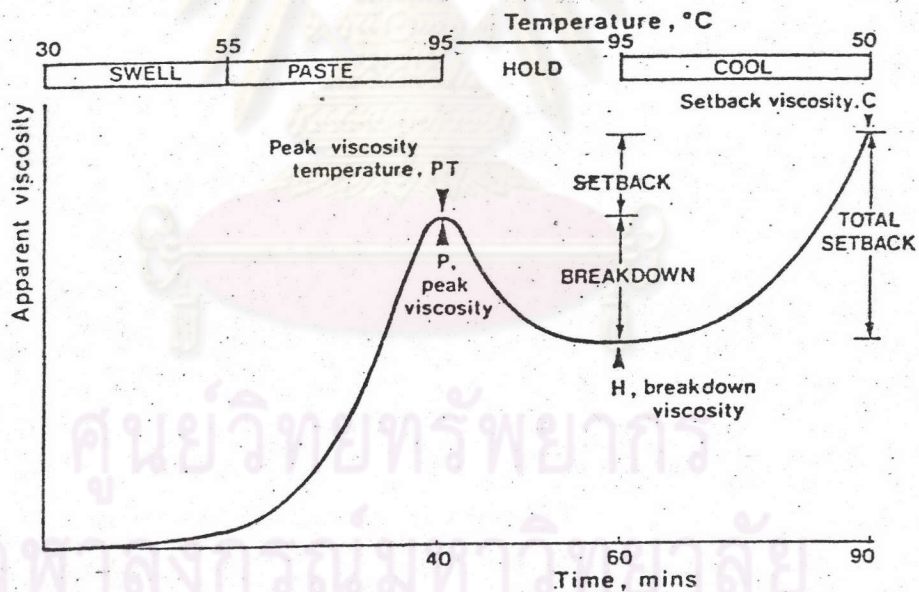


รูปที่ 5 กราฟแสดงความหนืดของแป้งชนิดต่างๆ วัดด้วยเครื่อง Brabender Visco-Amylograph โดยใช้น้ำหนักแป้งแห้งในสารละลาย 500 มิลลิลิตร (22)



แบบ เอ เป็นลักษณะกราฟที่ได้จากแป้งที่มีการนองตัวสูง เช่น แป้งมันฝรั่ง แป้ง waxy sorghum  
 แบบ บี เป็นกราฟของเมล็ดแป้งที่มีการนองตัวปานกลาง ได้แก่ แป้งข้าวโพด และแป้งจากธัญพืชอื่นๆ  
 แบบ ซี เป็นกราฟของเมล็ดแป้งที่มีการนองตัวน้อย ได้แก่ แป้งถั่วต่างๆ แป้ง cross-bonded-waxy sorghum

เมื่อเมล็ดแป้งได้รับความร้อน จะดูดน้ำและนองตัวขยายใหญ่ขึ้น ในขณะที่เดียวกัน น้ำที่อยู่รอบๆ เหลือน้อยลง ทำให้เมล็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยาก ความหนืดของน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นมากจนถึงจุดสูงสุด (peak viscosity) ซึ่งช่วงนี้ แรงยึดเหนี่ยวภายในเมล็ดแป้งจะน้อยที่สุด และถ้ายังได้รับความร้อนหรือการกวนอีก โครงสร้างภายในจะฉีกออก น้ำที่อยู่ภายในเมล็ดแป้งจะออกมารวมอยู่กับอะไมโลสและอะไมโลเพคติน ทำให้ความหนืดลดลง (breakdown) เมื่อปล่อยให้ paste เย็นลง จะเกิดเป็นเจลขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 กราฟแสดง pasting parameters ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งวัดด้วยเครื่อง Brabender Visco-Amylograph (24)

peak viscosity หมายถึง ค่าความหนืดสูงสุด เป็นจุดที่เมล็ดแป้งดูดน้ำและนองตัวมากที่สุด แป้งแต่ละชนิดมีค่าความหนืดสูงสุดไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่เมล็ดแป้งดูดเข้าไป

breakdown หมายถึง เสถียรภาพความหนืดระหว่าง heating cycle มีค่าเท่ากับ ผลต่างระหว่างความหนืดสูงสุด และความหนืดที่อุณหภูมิ  $95^{\circ}\text{C}$  นาน 20 นาที แสดงถึงความคงทนต่อการกวนของเม้ตแป้งในระหว่างได้รับความร้อน ถ้าผลต่างมีค่ามาก หมายถึง เม้ตแป้งไม่มีความคงทนต่อการกวนจึงมีเสถียรภาพความหนืดต่ำ เช่น แป้งมันฝรั่ง ในทางตรงข้าม ถ้าผลต่างมีค่าน้อย หมายถึง เม้ตแป้งมีความคงทนต่อการกวนได้ดีจึงมีเสถียรภาพความหนืดสูง เช่น แป้งข้าวเจ้า และ แป้งแปรสภาพโดยวิธี cross-linking เป็นต้น

total setback หมายถึง ความหนืดของการคืนตัวทั้งหมด มีค่าเท่ากับ ผลต่างระหว่างความหนืดที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  และความหนืดที่อุณหภูมิ  $95^{\circ}\text{C}$  นาน 20 นาที ถ้าผลต่างมีค่ามาก แสดงว่า paste เกิดการคืนตัวสูง ถ้าผลต่างมีค่าน้อย แสดงว่า paste เกิดการคืนตัวต่ำ

### 2.3. การแปรสภาพแป้ง

เป็นการปรับปรุงสมบัติของแป้ง ให้มีลักษณะตามความต้องการในการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม กรรมวิธีการแปรสภาพ ได้แก่ การแปรสภาพโดยวิธีทางพันธุศาสตร์ ทางเคมี ทางกายภาพ และการใช้เอนไซม์ (5) งานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะการแปรสภาพแป้งโดยทางเคมี เพราะนอกจากปรับปรุงให้มีสมบัติตามความต้องการแล้ว ยังนิยมใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอาหาร

#### 2.3.1 การแปรสภาพแป้งทางเคมี

เป็นการเปลี่ยนแปลงลักษณะหรือสมบัติบางอย่างของแป้งด้วยปฏิกิริยาเคมี ซึ่งก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแก่องค์ประกอบของแป้งเพียงเล็กน้อย แต่ไม่ทำลายโครงสร้างของเม้ตแป้ง (4,23) การแปรสภาพแป้งทางเคมีทำได้หลายวิธีตามปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น อาจเป็นปฏิกิริยาที่ทำให้โมเลกุลแป้งเกิดแตกตัว (conversion) ปฏิกิริยาแทนที่ภายในโมเลกุลแป้ง (substitution) และปฏิกิริยา cross-linking (5) เป็นต้น มีรายงานการวิจัยเกี่ยวกับการนำแป้งแปรสภาพโดยวิธี cross-linking ไปใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์แป้งชงทอด (18,26)

Cross-linking เป็นการแปรสภาพแป้งทางเคมีโดยใช้สารซึ่งมี functional group สำหรับทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในเม้ตแป้งมากกว่า 1 กลุ่ม โดยเกิดพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) ทำให้โมเลกุลภายในเม้ตแป้งจับตัวกันแน่นยิ่งขึ้น (6,23) ในขณะที่เกิดปฏิกิริยา



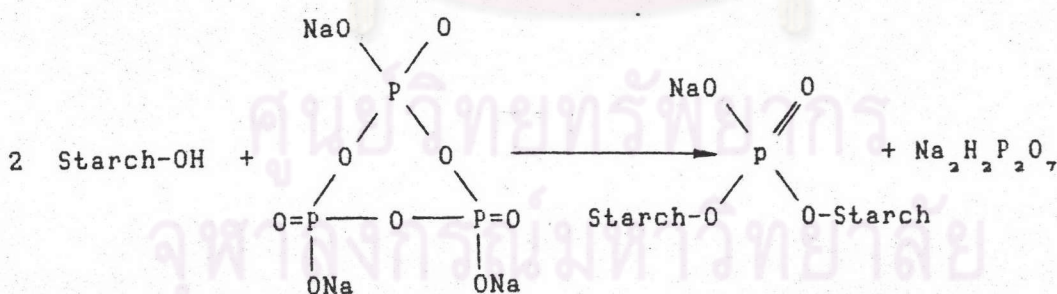
ต้องพยายามให้เกิดขึ้นภายในเม็ดแป้งเท่านั้นจึงจะทำให้โมเลกุลมากกว่า 2 โมเลกุลจับตัวกันได้ (6) ส่งผลให้แป้งมีสมบัติต่างๆ เช่น ความหนืด ความสามารถในการพองตัวของเม็ดแป้ง รูปแบบการละลาย และการทนต่อแรงเฉือน (shear force) เปลี่ยนแปลงไป ขึ้นกับระดับของ cross-linking ส่วนใหญ่ในผลิตภัณฑ์อาหาร มักใช้ระดับของ cross-linking ต่ำๆ ประมาณ 1 cross-linking ต่อ AUG 100-1,000 หน่วย (23,27)

### 2.3.1.1 สารเคมีที่นิยมใช้ในปฏิกิริยา cross-linking

สารเคมีที่ใช้มีหลายชนิด เช่น acetic acid anhydride ผสมกับ citric acid anhydride หรือ adipic acid anhydride, metaphosphate, phosphorus oxychloride ฯลฯ (5,6,28)

งานวิจัยนี้เลือกใช้ โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต ซึ่งเป็นเกลือที่ละลายได้ดีในน้ำ (29) หาง่าย ราคาถูก และนิยมใช้ในการแปรสภาพแป้งด้วยวิธี cross-linking สำหรับอุตสาหกรรมอาหาร (4,27) นอกจากนี้ ยังมีรายงานการวิจัยเกี่ยวกับการใช้แป้งที่ผ่านการแปรสภาพโดยวิธี cross-linking ด้วยโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต ในผลิตภัณฑ์แป้งชุบทอด (30)

วิธี cross-linking แป้งโดยใช้โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาส่วนใหญ่เป็น ไดสตาร์ชฟอสเฟต (distarch phosphate) (27,29,30) ดังปฏิกิริยา



สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาของประเทศไทย และสหรัฐอเมริกาได้กำหนดชนิดของสารเคมีที่อนุญาตให้ใช้ และข้อจำกัดในการใช้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ชนิดของแป้งแปรสภาพ กรรมวิธี และข้อจำกัดของผลิตภัณฑ์

ชนิดของแป้งแปรสภาพ	กรรมวิธี	ข้อจำกัดของผลิตภัณฑ์
ไคสตาร์ชฟอสเฟต (distarch phosphate)	ผ่านกระบวนการเอสเตอริฟิเคชัน สารไคลารหนึ่ง ดังนี้ 1) โซเดียมไตรเมต้าฟอสเฟต 2) ฟอสฟอรัสออกซิคโลไรด์	ปริมาณฟอสเฟต เมื่อคำนวณ เป็น ฟอสฟอรัสต้องไม่เกิน ร้อยละ 0.14 สำหรับแป้ง จากมันฝรั่งหรือข้าวสาลี และ ไม่เกินร้อยละ 0.04 สำหรับ แป้งอื่น ๆ

เนื่องจาก ฟอสฟอรัสออกซิคโลไรด์ เป็นสารที่หายาก ราคา  
ค่อนข้างแพง ดังนั้นจึงเลือกศึกษาเฉพาะโซเดียมไตรเมต้าฟอสเฟต

#### 2.3.1.2 สภาวะในการทำปฏิกิริยา cross-linking ด้วยโซเดียม ไตรเมต้าฟอสเฟต

Kerr และ Cleveland (29) ได้ศึกษาการแปรสภาพแป้งด้วย  
เกลือไตรเมต้าฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ โดยใช้โซเดียมไตรเมต้าฟอสเฟต ปริมาณ 3.3 กรัม ทำ  
ปฏิกิริยากับน้ำแป้ง ซึ่งเตรียมจากแป้งข้าวโพดที่มีความชื้นร้อยละ 10หนัก 180 กรัม ในน้ำ  
325 มิลลิลิตร ปรับ pH เป็น 10.2 ด้วยโซเดียมคาร์บอเนต อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาประมาณ  
50°C หรือต่ำกว่าอุณหภูมิแป้งสุก หลังจากสิ้นสุดปฏิกิริยาปรับ pH เป็น 6.7 กรอง และล้างแล้ว  
ทำให้แห้ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่เป็นไคสตาร์ชฟอสเฟตซึ่งเกิดการสูกของแป้งได้ยากขึ้น และมี  
เสถียรภาพความหนืดดีขึ้นในระหว่างการให้ความร้อนสูง

#### 2.3.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการแปรสภาพแป้ง โดยวิธี cross-linking ด้วยโซเดียมไตรเมต้าฟอสเฟต

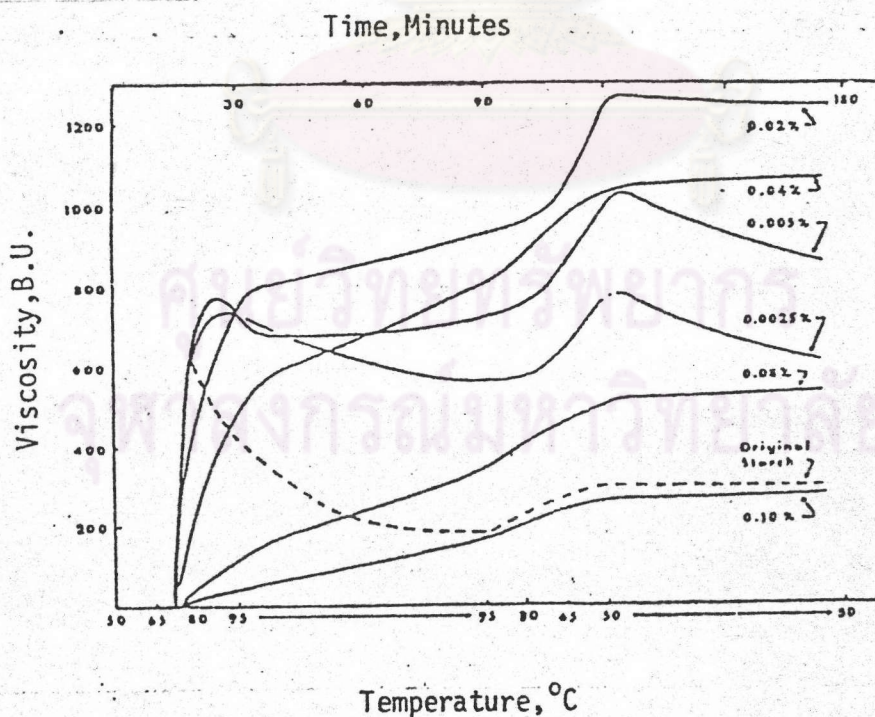
ปัจจัยหลักที่สำคัญในการแปรสภาพแป้ง โดยวิธี cross-linking  
ด้วยโซเดียมไตรเมต้าฟอสเฟต มีดังนี้



### 1. ปริมาณสารเคมีที่ใช้

Kerr และ Cleveland (29) ได้ศึกษาผลของระดับ

phosphorylation ต่อสมบัติของแป้งโดสคาร์ชฟอสเฟต โดยใช้โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตปริมาณต่างกัน (ร้อยละ 0.023-0.556) ของน้ำหนักแป้งแห้ง ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืด พบว่าเมื่อปริมาณสารมากขึ้น ความหนืดของ paste ลดลง และจากการศึกษาปฏิกิริยา cross-linking แป้ง waxy sorghum ด้วยโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต ปริมาณร้อยละ 0.0025-0.10 ของน้ำหนักแป้งแห้ง พบว่า native waxy sorghum จะพองตัวเกิดเป็น paste อย่างรวดเร็ว ความหนืดจะลดต่ำลงเมื่อมีการกวนในระหว่างได้รับความร้อน แต่แป้งแปรสภาพโดยใช้โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตระดับต่ำๆ มีผลทำให้ความหนืดในระหว่างได้รับความร้อนของ paste มีค่าเพิ่มขึ้น paste มีความคงทนต่อการกวนดีขึ้นจึงมีเสถียรภาพความหนืดสูงขึ้น และเมื่อปริมาณของสารในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ความหนืดของ paste จะไม่ปรากฏเป็นยอดสูงสุด แต่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ระหว่างได้รับความร้อน เมื่อปริมาณสารสูงขึ้นจนกระทั่งเกิดปฏิกิริยา cross-linking ในระดับสูงมาก มีผลทำให้ความหนืดของ paste ลดต่ำลง (27) ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟแสดงความหนืดของแป้ง waxy sorghum แปรสภาพด้วยโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต ปริมาณต่างกัน (ปริมาณที่ใช้คิดเป็นร้อยละของน้ำหนักแป้งแห้ง) (27)



ปริมาณสารที่ใช้เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความคงตัว และความหนืดที่ดี แตกต่างกันขึ้นกับชนิดของแป้ง เช่น ในแป้ง waxy sorghum เมื่อใช้โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตร้อยละ 0.02 ของน้ำหนักแป้งแห้ง จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดสูงสุด และมีเสถียรภาพความหนืดสูง แต่ในแป้งข้าวโพดพบว่าปริมาณโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 0.01 ของน้ำหนักแป้งแห้ง โดยทั่วไปใช้โซเดียมเมตาฟอสเฟตร้อยละ 0.01-3.0 ของน้ำหนักแป้งแห้ง สำหรับงานวิจัยนี้เลือกศึกษาผลของปริมาณโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต ต่อปฏิกิริยา cross-linking แป้งข้าวเจ้า โดยใช้ปริมาณต่างกัน 3 ระดับ คือ ร้อยละ 1.4, 1.7 และ 2.0 ของน้ำหนักแป้งแห้ง เนื่องจากได้ศึกษาเบื้องต้น พบว่าปริมาณโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตในระดับต่างๆ มีผลต่อปฏิกิริยา cross-linking แป้งข้าวเจ้าไม่ต่างกัน และมีรายงานการศึกษาการนำแป้งข้าวเจ้าแปรสภาพด้วยโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตร้อยละ 1.4 ของน้ำหนักแป้งแห้ง เวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง ไปใช้ในผลิตภัณฑ์แป้งชุบทอดแล้วให้ผลน่าพอใจ (31) แต่การที่ต้องใช้เวลานานถึง 8 ชั่วโมงนั้น ไม่เหมาะสมในการผลิตทางด้านอุตสาหกรรมเพราะทำให้ต้นทุนสูงขึ้น ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตในระดับที่สูงเพื่อเป็นการลดเวลาในการทำปฏิกิริยาให้น้อยลงซึ่งจะช่วยให้ต้นทุนในการผลิตต่ำลง เนื่องจากโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตมีราคาถูกประมาณ 65 บาทต่อกิโลกรัม

2. อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น แต่อุณหภูมิที่ใช้ต้องต่ำกว่าอุณหภูมิแป้งสุก (27,30) โดยทั่วไป อุณหภูมิต่ำสุดที่เหมาะสมกับการทำปฏิกิริยา cross-linking ด้วยโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต คือ 50°C (27) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 2 ระดับ คือ 50°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำสุดที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยา และที่อุณหภูมิ 55°C ทั้งนี้เนื่องจากแป้งข้าวเจ้าส่วนใหญ่ผลิตมาจากปลายข้าวหลายชนิดซึ่งมีอุณหภูมิแป้งสุกแตกต่างกัน จึงไม่ควรใช้อุณหภูมิสูงเกินไปในการทำปฏิกิริยา

3. เวลาในการทำปฏิกิริยา มีรายงานการศึกษาผลของเวลาต่อปฏิกิริยา cross-linking แป้งข้าวโพดด้วยโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตร้อยละ 2 ของน้ำหนักแป้งแห้ง pH 10.2 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50°C พบว่า paste แป้งแปรสภาพที่ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 50 นาที มีความหนืดสูงสุด เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น ถ้าเวลานานมากกว่า 24 ชั่วโมง ปฏิกิริยาเกิดได้สูงมากจนแป้งไม่สามารถเกิดการสุกได้เมื่อต้มในน้ำเดือด (29)



มีรายงานการศึกษาที่พบว่า มีความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโซเดียม ไตรเมต้าฟอสเฟต อุณหภูมิและเวลา ในทิศทางเสริมกัน (29) โดยอาจใช้ปริมาณสูงขึ้น แต่ลด อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาให้ต่ำกว่า  $50^{\circ}\text{C}$  โดยที่ใช้เวลาเท่าเดิม (29) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้สาร ในปริมาณค่อนข้างสูง ทำปฏิกิริยาทั้งที่  $50^{\circ}\text{C}$  และสูงกว่าคือ  $55^{\circ}\text{C}$  จึงเลือกศึกษาเวลาสำหรับทำ ปฏิกิริยาช่วงสั้น ๆ คือ 1.5 3.0 และ 4.5 ชั่วโมง

4. สภาพความเป็น กรด-ด่าง มีผลต่อปฏิกิริยาโดยเฉพาะการ cross-linking ด้วยโซเดียมไตรเมต้าฟอสเฟต เพราะโซเดียมไตรเมต้าฟอสเฟตมีความคงตัว และเกิดปฏิกิริยาได้ดี ในสภาพที่เป็นด่าง (pH ในช่วง 8-11) แต่ปฏิกิริยาฟอสฟอรีเลชัน (phosphorylation) ของแป้งมีประสิทธิภาพมากที่สุดที่ pH 11 (29) สารที่ใช้ปรับ pH อาจเป็น โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนต หรือกับแคลเซียมคาร์บอเนต สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดให้ pH คงที่ คือ  $11.00 \pm 0.10$  โดยใช้โซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารปรับ pH

เนื่องจากข้อมูลส่วนใหญ่ด้านการแปรสภาพแป้งโดยวิธี cross-linking เป็นลึกลับ ซึ่งกล่าวถึงสภาวะในการทำปฏิกิริยาโดยเฉพาะการกวนไม่ละเอียดนัก มักจะ กล่าวเฉพาะว่า มีการกวน (stir) ในระหว่างทำปฏิกิริยาโดยไม่กล่าวถึงความเร็วของเครื่องกวน ที่ใช้ การกวนจะทำให้มีแรงกระทำต่อเม็ดแป้ง ดังนั้น ถ้ามีการกวนผสมอย่างรุนแรงเกินไป จะทำให้เม็ดแป้งเสียดสีกัน ทำให้เม็ดแป้งเสียหาย (starch damage) ไม่คงรูปร่างซึ่งมีผลต่อสมบัติของ แป้งแปรสภาพที่ได้ ในทางตรงกันข้าม การกวนในระดับต่ำเกินไปทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้น้อย ดังนั้น ถ้ามีการกวนในระดับที่เหมาะสม นอกจากไม่ทำให้เม็ดแป้งเสียหายแล้ว ยังช่วยให้สารเคมีเข้าทำ ปฏิกิริยากับเม็ดแป้งได้ดีขึ้นและสม่ำเสมอมากขึ้น แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดด้านความเร็วของ เครื่องกวนที่ใช้ คือ ปรับระดับได้ตั้งแต่ 10-110 รอบต่อนาทีเท่านั้น ดังนั้น จึงเลือกศึกษาผลของ ความเร็วของเครื่องกวน 2 ระดับ คือ 60 และ 110 รอบต่อนาที ที่มีต่อปฏิกิริยา cross-linking

### 2.3.2 การประเมินผลการเกิดปฏิกิริยา cross-linking

การวิเคราะห์ผลการเกิดปฏิกิริยา cross-linking โดยตรงในทางปฏิบัติ ค่อนข้างยุ่งยาก โดยทั่วไปนิยมตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ด้านความหนืด และความสามารถ ในการนongตัวของแป้งแปรสภาพ เป็นต้น (32)

ในงานวิจัยนี้เลือกประเมินผลการเกิดปฏิกิริยา cross-linking โดยพิจารณา



การเปลี่ยนแปลงความหนืดของ paste แป้งข้าวเจ้าแปรสภาพ ซึ่งวัดด้วยเครื่อง Brabender Visco-Amylograph ความหนืดของแป้งแปรสภาพโดยการ cross-linking จะแตกต่างจาก แป้งตามธรรมชาติ (native flour) เนื่องจากการ cross-linking ทำให้เกิดการสร้าง พันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลซึ่งทำให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น เกิดการสูกและการพองตัวของแป้งข้าลงจึงมีอุณหภูมิแป้งสูงสูงขึ้น เม็ดแป้งมีความคงทนต่อการกวนในระหว่างได้รับความร้อนดี จึงมีเสถียรภาพความหนืดระหว่าง heating cycle สูงขึ้น แต่ถ้าเกิดปฏิกิริยา cross-linking ในระดับสูงเกินไป จะจำกัดการพองตัวของเม็ดแป้ง มีผลทำให้ความหนืดของ paste แป้งแปรสภาพลดต่ำลง แต่ยังคงมีเสถียรภาพความหนืดสูงขึ้น (27)

นอกจากนี้ปฏิกิริยา cross-linking ยังทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่าง กิ่งก้านที่เป็นสาขาของโมเลกุลอะไมโลเพคติน ให้มีลักษณะเป็นสายยาวคล้ายโมเลกุลอะไมโลส มากขึ้น ซึ่งทำให้สามารถจับไอโอดีนที่ใช้วิเคราะห์อะไมโลสได้สูงขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาปริมาณอะไมโลส รวมทั้งปริมาณฟอสเฟตในรูป ฟอสฟอรัสในแป้งข้าวเจ้าแปรสภาพ ประกอบการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความหนืดของ paste แป้งข้าวเจ้าแปรสภาพ เพื่อประเมินผลการเกิดปฏิกิริยา cross-linking

### 2.3.3 สมบัติของแป้งแปรสภาพ โดยวิธี cross-linking และการนำไป

#### ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร

แป้งที่ผ่านการแปรสภาพโดยวิธี cross-linking แล้ว จะมีเสถียรภาพความหนืด เพิ่มขึ้น แม้อยู่ในสภาวะที่รุนแรงต่างๆ เช่น สภาวะที่เป็นกรด สภาวะที่มีความร้อนสูงๆ หรือสภาวะที่มีการผสมอย่างรุนแรง จึงนิยมใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น อาหารเด็กอ่อน salad dressing (5,30) การเลือกระดับ cross-linking ของแป้งแปรสภาพไปใช้ในผลิตภัณฑ์ ขึ้นกับลักษณะเนื้อของอาหารที่ต้องการ สภาวะความเป็นกรด ระดับน้ำตาลที่มีอยู่ และอุณหภูมิที่ต้องการใช้ อาหารที่ต้องผ่านขบวนการผลิตที่รุนแรงอาจต้องใช้แป้งที่มีระดับ cross-linking สูงมาก (28)

ได้มีการใช้แป้งที่ผ่านการแปรสภาพด้วยวิธีการต่างๆ เป็นส่วนผสมในแป้งชุบทอด เพื่อปรับปรุงให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพด้านต่างๆ ตามต้องการ เช่น pregelatinization เพื่อปรับปรุง การเกาะติด วิธี cross-linking เพื่อลดความสามารถในการพองตัว (swelling capacity)



(27,33) ซึ่งมีผลทำให้การดูดซับน้ำมันของอาหารระหว่างทอดน้อยลง แป้งที่ผ่านการ cross-linking จะมีความเข้มข้นของอะไมโลสเพิ่มขึ้น (34) ซึ่งทำให้เกิดฟิล์มที่แข็งแรง มีผลทำให้ความกรอบของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น แต่ถ้าถูก cross-linking มากไป อาหารจะไม่พองตัว ดังนั้นถ้าเลือกใช้ระดับ cross-linking ที่เหมาะสม ทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารมีลักษณะเนื้อดีขึ้น ได้มีการนำแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตในประเทศมาแปรสภาพโดยวิธี cross-linking และ acid hydrolysis เพื่อนำไปชุบอาหารทอด พบว่า แป้งที่ผ่านการแปรสภาพวิธี cross-linking ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีกว่า โดยพิจารณาความกรอบเป็นเกณฑ์ (31)

สำหรับงานวิจัยนี้ เลือกศึกษาเฉพาะการแปรสภาพแป้งทางเคมีโดยวิธี cross-linking ทั้งนี้เพราะโมเลกุลแป้งที่มีการ cross-linking นอกจากจะเพิ่มปริมาณอะไมโลสแล้ว (34) ยังทำให้อัตราการเกิด gelatinization ลดลง (27,28) เป็นผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความกรอบดีขึ้น เนื่องจากแป้งเกิดเป็นเจลเคลือบชั้นอาหารข้าง ทำให้หน้าที่ผสมในแป้งหรือในชั้นอาหารมีโอกาสถูกความร้อนและระเหยออกไปได้มาก แต่ถ้าแป้งเกิดเป็นเจลได้เร็ว น้ำระเหยออกได้น้อยลง แป้งที่เคลือบอยู่หลังทอดสุกแล้วมีโอกาสดูดซับน้ำจากชั้นอาหารได้มากขึ้น เป็นผลให้ความกรอบของผลิตภัณฑ์ลดลง นอกจากนี้แป้งที่ผ่านการ cross-linking ยังมีเสถียรภาพความหนืดเพิ่มขึ้นในสภาวะที่รุนแรงต่างๆ เช่น ในสภาวะที่มีความร้อนสูงๆ ทำให้แป้งเกาะติดชั้นอาหารได้ดีขึ้นในระหว่างการทอด ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงๆ ช่วง 150-220°C เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความนุ่มกรอบและสี เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค เพราะถ้าใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 150°C จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความนุ่มกรอบน้อยลง แต่ถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่า 220°C ทำให้เกิดปฏิกิริยา caramelization อย่างรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีผิวสีน้ำตาลดำนอกเร็วเกินไปโดยที่เนื้อข้างในอาจยังไม่สุก (35)

#### 2.4 แป้งชุบทอดสำเร็จรูป (dry batter mix)

แป้งชุบทอดสำเร็จรูปประกอบด้วยแป้ง (flour) เป็นวัตถุดิบหลักประมาณ ร้อยละ 80-90 ของน้ำหนักทั้งหมด และเครื่องปรุงแต่งกลิ่นรส (seasonings) ในปริมาณแตกต่างกัน โดยเฉลี่ยอยู่ในช่วงร้อยละ 3-5 ของน้ำหนักทั้งหมด (36)

แป้งชุบทอดชนิดพองฟู (tempura flour or leavened batters) หมายถึง แป้งชุบทอด ที่มีส่วนผสมของผงฟู มีลักษณะขึ้นเหนียวมาก เนื่องจากมีแป้งเป็นส่วนผสมในอัตราส่วนสูง (33)

แป้งชูบทอดที่เคลือบบนชิ้นอาหารช่วยส่งเสริมให้ผลิตภัณฑ์อาหารมีลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส และกลิ่นรสที่ดี (33, 37, 38) นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันการสูญเสียความชื้น และเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์อาหารให้สูงขึ้น (37)

#### 2.4.1 สูตรและส่วนผสมทั่วไปของแป้งชูบทอด

ส่วนผสมโดยทั่วไปของแป้งชูบทอด แบ่งตามปริมาณและหน้าที่เป็น 2 กลุ่ม

(33) คือ

##### 2.4.1.1 ส่วนผสมหลัก ได้แก่ แป้ง (flour)

แป้งที่นิยมใช้ได้แก่ แป้งสาลี ชนิดแป้งเอนกประสงค์ ซึ่งมีโปรตีนประมาณร้อยละ 10-11 และแป้งขนมปัง ซึ่งมีโปรตีนสูงประมาณร้อยละ 12-14 โปรตีนที่มีในแป้งสาลีมีความสำคัญทั้งด้านคุณค่าทางอาหาร และลักษณะของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะไกลอะดิน และกลูเตนิน ซึ่งสามารถรวมตัวกันเป็นกลูเตน ซึ่งสามารถสร้างมวลที่เกาะกันเป็นก้อน (cohesive mass) และกักเก็บก๊าซรวมทั้งให้โครงสร้างที่เบา (light cellular structure) โดยที่โปรตีนในแป้งจากธัญพืชอื่น เช่น แป้งข้าวเจ้า และข้าวโพดไม่สามารถจะเกิดโครงสร้างที่กักเก็บก๊าซไว้ได้ หรือให้ลักษณะแป้งชูบทอดที่มีความหนืดเหมือนโปรตีนจากแป้งสาลีได้

นอกจากแป้งสาลีแล้ว แป้งชนิดอื่นที่ใช้เป็นส่วนผสมในแป้งชูบทอด ได้แก่ แป้งข้าวโพด แป้งข้าวเจ้า และแป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น (39)

2.4.1.2 ส่วนผสมที่มีปริมาณน้อย เช่น กัม แป้งแปรสภาพ นมและหางนม ไข่ ผงฟู และเครื่องปรุงแต่งกลิ่นรส เป็นต้น ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ช่วยส่งเสริมคุณสมบัติเฉพาะด้าน เช่น ความหนืด การเกาะติดผิวอาหาร ลักษณะเนื้อสัมผัส สี และกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์

##### 2.4.2 อัตราส่วนของน้ำที่ใช้ผสมต่อปริมาณแป้งชูบทอด

ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมแป้งชูบทอด แตกต่างกันขึ้นกับคุณภาพและองค์ประกอบของแป้งที่เป็นส่วนผสม ปกติเมตแป้งที่สมบูรณ์จะดูดน้ำที่อุณหภูมิห้องได้ประมาณร้อยละ 30 ของน้ำหนัก แต่เมตแป้งที่เสียหายทางกายภาพสามารถดูดน้ำได้มากกว่านี้ นอกจากนี้แป้งสาลีที่มีโปรตีนสูง มีแนวโน้มที่จะมีเมตแป้งที่เสียหายในระหว่างการผลิตมากขึ้นเช่นกัน ดังนั้น จึงต้องใช้น้ำปริมาณมากขึ้น สำหรับผสมเพื่อให้มีความหนืดที่เหมาะสมสำหรับชูบอาหารก่อนทอด

สำหรับในระบบของแป้งชูบทอด ซึ่งจำกัดปริมาณน้ำ พบว่าเมื่อได้รับความร้อนในระหว่างการทอด จะมีผลทำให้การสุกของแป้งช้าลง ดังนั้น จึงต้องใช้น้ำในปริมาณเพียงพอที่จะ



ทำให้เม็ดแป้งสุกและเกิดเป็นเจลเคลือบชั้นอาหารได้ นอกจากนี้ ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมยังมีผลต่อความหนืด และความสามารถในการเกาะติดผิวอาหารของแป้ง ถ้าใช้น้ำปริมาณน้อยมีผลทำให้ batter ขึ้นเกินไป ถึงแม้จะช่วยให้ความสามารถในการเกาะติดผิวอาหารในระหว่างการทอดดีขึ้น แต่หลังทอดสุกแล้ว พบว่า แป้งที่เคลือบอยู่มีแนวโน้มที่จะหลุดออกได้ง่ายกว่าเมื่อชุบ batter เหลว (40) เนื่องจากมีปริมาณน้ำน้อยเกินไปจนทำให้เม็ดแป้งสุกและเกิดเป็นเจลไม่สมบูรณ์เพียงพอ จึงเกาะติดได้ไม่ดี โดยทั่วไปปริมาณน้ำที่ใช้ต่อแป้งชุบทอดประมาณ 1.5-2.0:1 (36)

### 2.4.3 คุณสมบัติที่ต้องการของแป้งชุบทอด

2.4.3.1 ความกรอบ (crispness) เป็นสมบัติที่สำคัญของแป้งชุบทอด มีปัจจัยหลายประการที่มีผลต่อความกรอบของผลิตภัณฑ์ ดังนี้ (33)

1. ชนิดของแป้งที่เป็นส่วนผสมหลัก แป้งแต่ละชนิดมีผลต่อความกรอบของผลิตภัณฑ์แตกต่างกัน ขึ้นกับองค์ประกอบและสมบัติของแป้ง ได้แก่ อัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพคติน ซึ่งมีผลต่ออุณหภูมิแป้งสุกและการเกิดเป็นเจลเคลือบชั้นอาหาร แป้งที่มีอะไมโลสสูงจะมีอุณหภูมิแป้งสุกสูงซึ่งช่วยให้น้ำที่ผสมในแป้งหรือในชั้นอาหารมีโอกาสถูกความร้อน และระเหยออกได้มากกว่าก่อนที่แป้งเกิดเป็นเจลเคลือบชั้นอาหาร ทำให้แป้งที่เคลือบอยู่หลังจากทอดสุกแล้วดูดซับน้ำจากชั้นอาหารได้น้อยลง จึงยังคงมีความกรอบมากกว่าแป้งที่มีอุณหภูมิแป้งสุกต่ำ และเกิดเป็นเจลอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ อะไมโลสยังเกิดเป็นฟิล์มที่มีโครงสร้างที่แข็งแรงกว่าอะไมโลเพคติน ดังนั้นแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจึงช่วยให้ผลิตภัณฑ์แป้งชุบทอดมีความกรอบสูงขึ้น แต่ต้องมีอัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพคตินในระดับที่เหมาะสมไม่สูงเกินไป ทั้งนี้เนื่องจากถ้ามีอะไมโลสสูงเกินไป ทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะแข็งกระด้างจนผู้บริโภคไม่ยอมรับ

องค์ประกอบอื่นที่สำคัญในแป้งที่มีผลต่อความกรอบของผลิตภัณฑ์แป้งชุบทอด ได้แก่ โปรตีน เนื่องจากโปรตีนมีผลต่ออุณหภูมิแป้งสุก และทำให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรง (38) แป้งที่มีโปรตีนสูง มีผลทำให้อุณหภูมิแป้งสุกสูงขึ้น ระดับโปรตีนในแป้งชุบทอดที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง ร้อยละ 9-11 ถ้ามีระดับสูงกว่าร้อยละ 11 ทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะแข็งเกินไป แต่ถ้าต่ำกว่าร้อยละ 9 มีแนวโน้มที่ทำให้เกิดลักษณะปรากฏที่เป็นจุด (spotty) บนชิ้นไก่ (33) นอกจากนี้ คุณภาพของเม็ดแป้งก็มีผลต่อความกรอบของผลิตภัณฑ์ แป้งที่มีปริมาณเม็ดแป้งที่เสียหายสูงทำให้ผลิตภัณฑ์มีความกรอบมากเกินไป เนื่องจากเกิดการสุกของแป้งไม่สมบูรณ์เพียงพอในระหว่างการทอด



งานวิจัยนี้เลือกศึกษาการแปรสภาพแป้งข้าวเจ้าโดยวิธี cross-linking ด้วยโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต เพื่อปรับปรุงให้แป้งข้าวเจ้ามีอุณหภูมิแป้งสุก อัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพคตินที่เหมาะสม เพื่อทำให้ความกรอบของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น

2. วิธีการให้ความร้อน ที่นิยมใช้คือ การทอดแบบ deep-fat frying ซึ่งต้องควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ทอดให้อยู่ระหว่าง 150-220°C เพราะถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 150°C ผลิตภัณฑ์จะมีความพองกรอบน้อยลง แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 220°C จะเกิดปฏิกิริยา caramelization เร็วขึ้น ทำให้ผิวด้านนอกของผลิตภัณฑ์มีสีน้ำตาลอย่างรวดเร็ว โดยที่น้ำในชั้นอาหารระเหยออกไปได้น้อย ความกรอบของผลิตภัณฑ์จะลดลง (35) นอกจากนี้วิธีการทำให้ชั้นอาหารสุก (precooking) ก่อนนำมาชุบ batter ก็มีส่วนช่วยให้ความกรอบของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น เนื่องจาก น้ำบางส่วนในชั้นอาหารได้ระเหยออกไปก่อนนำมาชุบแป้งทอด

3. ส่วนผสมชนิดอื่นๆ ที่ใช้ ส่วนผสมชนิดอื่นๆ นอกจากแป้ง เช่น ไข่ สตาร์ช แป้งแปรสภาพ หรือกัมบางชนิด มีผลทำให้ความกรอบของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น (33)

#### 2.4.3.2 ความสามารถในการเกาะติดผิวอาหาร (adhesion)

เป็นคุณภาพที่สำคัญประการหนึ่งของผลิตภัณฑ์แป้งชุบทอด เนื่องจากมีผลต่อลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ ในอุตสาหกรรม การผลิตผลิตภัณฑ์แป้งชุบทอดถึงสำเร็จรูป หรือสำเร็จรูปทั่วไปมักพบปัญหาด้านความสามารถในการเกาะติดผิวอาหารของแป้งชุบทอด ซึ่งนอกจากก่อให้เกิดความสูญเสียทางด้านเศรษฐกิจแล้ว ยังทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะปรากฏที่ไม่ดี ผู้บริโภคไม่ยอมรับ

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการเกาะติดผิวอาหาร ได้แก่

1. ชนิดของแป้งที่เป็นส่วนผสม แป้งแต่ละชนิดมีความสามารถในการเกาะติดผิวอาหารแตกต่างกัน แป้งชนิด waxy ซึ่งมีอะไมโลเพคตินในปริมาณสูง เมื่อได้รับความร้อนจนเกิดเป็นเจลจะมีความหนืดมากกว่าแป้งที่มีอะไมโลสสูง (6) ดังนั้นจึงทำให้มีความสามารถในการเกาะติดผิวอาหารได้ดีกว่าในระหว่างทอด แต่อะไมโลเพคตินทำให้เกิดโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา และเปราะง่ายกว่าอะไมโลส ดังนั้นภายหลังจากทอด แป้งชุบทอดที่มีอะไมโลเพคตินสูงจะเปราะ และหลุดออกจากชั้นอาหารได้ง่ายในระหว่างการบรรจุหรือขนส่ง สำหรับแป้งจากธัญพืช พบว่า แป้งชุบทอดที่มีส่วนผสมของแป้งจากธัญพืชชนิด waxy จะมีความยืดหยุ่น (elastic) มากกว่า แต่มีความแข็งกระด้าง (tough) น้อยกว่าแป้งจากธัญพืชชนิดธรมดา ทำให้มีแนวโน้มที่จะหลุดออกเป็นชิ้นเล็กๆ เมื่อมีการเคลื่อนย้ายภายหลังจากทอด แต่แป้งชุบทอด



ที่เตรียมจากแป้งสาลี ถ้าเกิดการหลุดจากชั้นอาหาร จะหลุดทั้งหมด (40) มีรายงานการศึกษา การปรับปรุงความสามารถในการเกาะติดผิวอาหารของแป้งชุบทอดในระบบอุตสาหกรรม โดยการแปรสภาพแป้งด้วยวิธีต่างๆ เช่น pregelatinization ทำให้แป้งมีสมบัติละลายน้ำเย็น ซึ่งช่วยให้แป้งเกาะติดผิวอาหารได้ดีขึ้นก่อนนำไปทอด การออกซิไดซ์ด้วยสารประกอบคลอรีนหรือ halogen gas อื่นๆ และการ cross-linking ช่วยให้แป้งเกาะติดอาหารได้ดีในระหว่างการทอด (6)

งานวิจัยนี้เลือกศึกษาการแปรสภาพแป้งโดยวิธี cross-linking ซึ่งทำให้แป้งแปรสภาพมีเสถียรภาพความหนืดสูงขึ้นในระหว่างการให้ความร้อน ดังนั้น จะทำให้แป้งเกาะติดชั้นอาหารได้ดีขึ้นในระหว่างการทอด

## 2. สารช่วยให้เกิดความข้นหนืด (thickening agent)

Baker และคณะ (41) ได้ศึกษาสารที่ช่วยปรับปรุงการเกาะติดผิวอาหารทั้งหมด 15 ชนิด รวมทั้ง สตาร์ช โปรตีน และกัม พบว่า โปรตีน ทำให้แป้งที่เคลือบเกาะติดดีกว่าสตาร์ชและกัม ในกลุ่มโปรตีน พบว่าอัลบูมินจากไข่ผง (dried egg albumin) ให้ผลดีที่สุด กลูเต็นให้ผลลำดับรองลงมา และโปรตีนจากถั่วเหลือง ก็มีผลทำให้การเกาะติดดีขึ้น แม้ว่าจะไม่สูงเท่าอัลบูมินจากไข่ผง หรือกลูเต็น แต่ชนิดอื่นๆ ที่ศึกษาไม่มีความแตกต่างทางสถิติ สำหรับปริมาณที่ใช้ พบว่าโดยเฉลี่ยใช้สารพวกโปรตีน (อัลบูมิน กลูเต็น หรือ soy concentrate) ประมาณร้อยละ 1.5 ซึ่งน้อยกว่าการใช้พวกกัม แต่ต้องใช้พวกสตาร์ชในปริมาณสูงกว่ากลุ่มอื่นๆ คือ เฉลี่ยประมาณร้อยละ 2.5 แต่อย่างไรก็ตาม มีรายงานการศึกษา พบว่า ปริมาณของไข่ในแป้งชุบทอดมีผลต่อความสามารถในการเกาะติดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (40) นอกจากนี้ไข่ยังมีราคาแพง ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น ในขณะที่ผลที่ได้ก็ยังไม่สม่ำเสมอ

3. ปริมาณน้ำที่ใช้ผสม ถ้าใช้น้ำในอัตราส่วนต่ำๆ ทำให้แป้งชุบทอดมีความหนืดสูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการเกาะติดผิวอาหารสูงขึ้นเช่นกัน

### 2.4.3.3 การอมน้ำมัน (fat absorption)

การอมน้ำมันของอาหารที่ทอดแบบ deep-fat frying เกี่ยวข้องกับหลายปัจจัย (42, 43, 44) ได้แก่

1. อัตราส่วนอะไมโลสต่ออะไมโลเพคตินในแป้งที่เป็นส่วนผสม อะไมโลสและอะไมโลเพคตินมีส่วนเกี่ยวข้องกับการบองตัวของเม็ดแป้งหลังจากได้รับความร้อน และทำให้เกิดโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะแตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อการอมน้ำมันของผลิตภัณฑ์

ในระหว่างการทอดแป้งที่มีอะไมโลสสูงจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีการนองตัวต่ำ ซึ่งมีผลทำให้การดูดซับหรืออมน้ำมันน้อยลง แต่แป้งที่มีอะไมโลเพคตินสูงจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีการนองตัวดี จึงทำให้ออมน้ำมันได้มากในระหว่างการทอด สำหรับผลิตภัณฑ์แป้งชุบทอดควรมีลักษณะนองตัวได้ดี แต่ไม่ควรดูดซับหรืออมน้ำมันมากเกินไป งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แป้งข้าวเจ้าแปรสภาพโดยวิธี cross-linking ซึ่งเป็นการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล นอกจากนี้ยังทำให้เกิดแรงเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของอะไมโลเพคตินให้มีลักษณะคล้ายอะไมโลสมากขึ้น ทำให้ความสามารถในการนองตัวของแป้งลดลงซึ่งส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้อมน้ำมันน้อยลงในระหว่างการทอด

2. ส่วนผสมอื่นๆ ที่ใช้ เช่น หางนม (whey) หรือสารที่ช่วยให้เกิดความข้นหนืดพวก hydroxy propyl methyl cellulase มีผลทำให้แป้งชุบทอดที่เคลือบอยู่บนอาหารดูดซับน้ำมันได้น้อยลง (33)

3. อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ทอด เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการอมน้ำมันของผลิตภัณฑ์ ควรใช้อุณหภูมิในการทอดสูงแต่เวลาน้อยซึ่งทำให้การอมน้ำมันต่ำลง เพราะขณะที่ร้อนขึ้น ความหนาแน่นของน้ำมันต่ำลง น้ำมันส่วนน้อยถูกดูดซับในเวลาจำกัด ส่วนเวลาในการทอดสัมพันธ์กับอุณหภูมิ คือถ้าใช้อุณหภูมิในการทอดต่ำ ต้องใช้เวลาทอดนานขึ้น ทำให้อาหารดูดซับน้ำมันได้มากขึ้น

นอกจากนี้ การอมน้ำมันของผลิตภัณฑ์ยังเกี่ยวข้องกับจุดควัน (smoking point) ของน้ำมัน อาหารจะอมน้ำมันมากขึ้นเมื่อน้ำมันที่มีจุดควันต่ำ เพราะไม่สามารถใช้อุณหภูมิในการทอดสูงๆได้ เนื่องจากเกิดการสลายตัวของน้ำมันมากขึ้น และรวมทั้งพื้นผิวของอาหารที่สัมผัสกับน้ำมัน อาหารที่มีขนาดใหญ่อมน้ำมันมากกว่าที่มีขนาดเล็ก และอาหารที่มีผิวหน้าขรุขระหรือมีรูพรุนจะอมน้ำมันมากกว่าอาหารที่มีผิวเรียบ เพราะมีพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับน้ำมันมากกว่า (44)

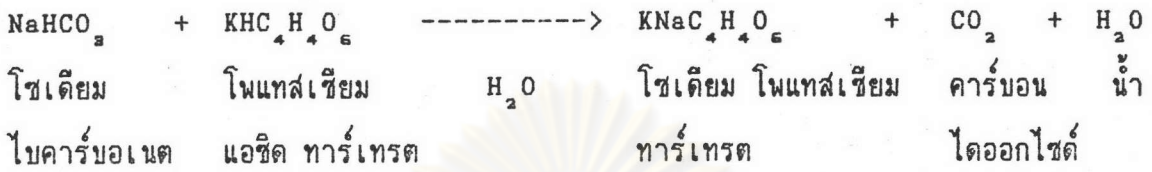
2.4.3.4 การนองตัว (puffing) เกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยหลัก 2 ปัจจัย คือ

1. การนองตัวโดยสมบัติของตัวแป้งเอง ซึ่งเกิดจากการนองตัว (swelling) และการดูดน้ำ (hydration) ของเม็ดแป้งเมื่อได้รับความร้อน น้ำแปรสภาพเป็นไอน้ำเมื่อได้รับความร้อนสูง ทำให้ปริมาตรขยายตัวหรือพองตัวออก (34) และจากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนของปริมาณอะไมโลสต่ออะไมโลเพคติน มีความสัมพันธ์กับระดับการนองตัวโดยตรง แป้งที่มีอะไมโลเพคตินสูง ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีการนองตัวดีแต่เบาและเปราะ (14) เมื่อมีปริมาณอะไมโลสเพิ่มขึ้น การนองตัวจะลดลง

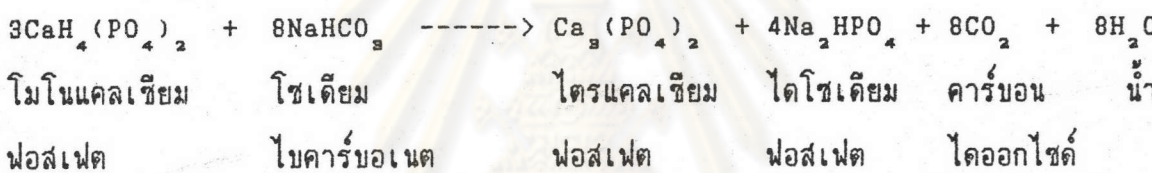
2. ผงฟูที่มีในผลิตภัณฑ์ ซึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีการนองตัวด้วยเช่นกัน (45)



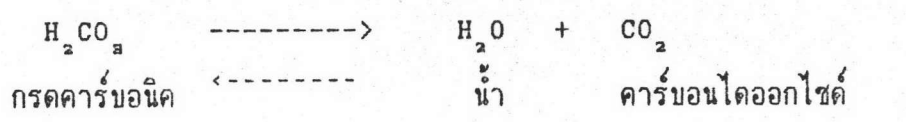
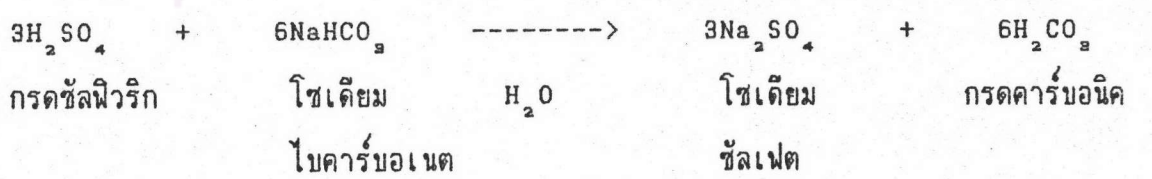
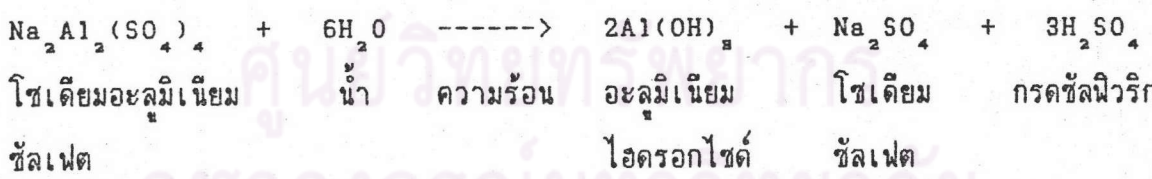
ผงฟูที่นิยมใช้ทั่วไปมี 2 แบบคือ แบบเกิดปฏิกิริยาเร็วหรือครั้งเดียว (quick or single acting) (40) เนื่องจากกรดของเกลือที่เป็นส่วนผสมละลายน้ำหรือของเหลวขณะเย็นทำให้เกิดก๊าซอย่างรวดเร็ว เช่น ผงฟูที่มีครีมออฟทาร์ทาร์ หรือ โบแทสเซียมแอซิดทาร์เทรตเป็นส่วนผสมจะเกิดปฏิกิริยาให้ก๊าซดังสมการ



ผงฟูแบบที่เกิดปฏิกิริยาช้าหรือเกิดปฏิกิริยาสองครั้ง (slow or double acting) เป็นผงฟูแบบที่มีส่วนผสมของกรด 2 ชนิด โดยชนิดแรกจะทำปฏิกิริยาเร็ว เช่น โมโนแคลเซียมฟอสเฟต โมโนไฮเดรต ดังสมการ



ต่อมากรดหรือเกลืออีกชนิดหนึ่ง จึงเริ่มเกิดปฏิกิริยา เมื่อขนมอยู่ในเตาอบความร้อนไปกระตุ้นให้เกิดการสลายตัวของโซเดียมอะลูมิเนียมซัลเฟต ได้กรดซัลฟิวริกซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับโซเดียมไบคาร์บอเนต ได้กรดคาร์บอนิกที่สลายตัวเป็นน้ำกับคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป ดังสมการ



สารเคมีที่สำคัญในผงฟูคือ โซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) ซึ่งมี ส่วนผสมของผงฟูประมาณร้อยละ 30 ผสมกับกรดของเกลือชนิดต่างๆ ถ้ามี  $\text{NaHCO}_3$  เป็นส่วนผสม ในปริมาณสูง ทำให้มีรสขมซึ่งผู้บริโภคไม่ยอมรับ และมีรายงานการศึกษาพบว่า ผลิตภัณฑ์แป้ง ชุบทอดที่ใช้ผงฟูเป็นส่วนผสม ได้รับการยอมรับมากกว่าใช้  $\text{NaHCO}_3$  เป็นส่วนผสม (31)

จากการศึกษาปริมาณของผงฟูซึ่งเป็นส่วนผสมในแป้งชุบทอด ที่มี จำหน่ายในประเทศ พบว่า มีปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักทั้งหมด

สำหรับในการศึกษานี้กำหนดให้ปริมาณผงฟูที่ใช้เป็นส่วนผสมในแป้ง ชุบทอด มีปริมาณคงที่คือร้อยละ 4.5 ของน้ำหนักทั้งหมด เพื่อลดปริมาณของผงฟูที่ใช้ให้น้อยลง ทำให้การบองตัวของผลิตภัณฑ์ลดลง ซึ่งส่งผลให้ผลิตภัณฑ์อมน้ำมันน้อยลง แต่เนื่องจากรายงานวิจัยนี้ ใช้แป้งข้าวเจ้าแปรสภาพโดยวิธี cross-linking เป็นส่วนผสม ทำให้การบองตัวของผลิตภัณฑ์ ลดต่ำกว่าแป้งธรรมชาติ ดังนั้น จึงไม่ควรใช้ผงฟูในปริมาณต่ำเกินไป ซึ่งมีผลทำให้การบองตัว ของผลิตภัณฑ์ต่ำจนผู้บริโภคไม่ยอมรับ

2.4.3.5 สีของผลิตภัณฑ์ (colour) ผู้บริโภคส่วนมากยอมรับผลิตภัณฑ์ ที่มีสีน้ำตาลทอง (golden brown) เนื่องจากปฏิกิริยา caramelization ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลง โดยเกิดไฮโดรไลซิสของน้ำตาลในแป้งจนได้ monosaccharide แล้วเกิด polymerization ได้สารสีน้ำตาล (46) เมื่อนำอาหารไปทอดที่อุณหภูมิสูง

ปัจจัยที่มีผลต่อสีของผลิตภัณฑ์ ได้แก่

1. องค์ประกอบของส่วนผสม องค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อสีของ ผลิตภัณฑ์ ได้แก่ แหล่งของโปรตีนและน้ำตาล ซึ่งเกี่ยวข้องกับแป้งที่เป็นส่วนผสม แป้งผสมระหว่าง waxy rice flour และ waxy corn starch ทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีน้ำตาลแวววาว (glossy brown) แป้งสาลีทำให้เกิดสี grayish-brown ในขณะที่แป้งผสมระหว่าง waxy corn starch และ corn starch จะให้สีที่จางกว่า สำหรับแป้งมันฝรั่งจะให้สีน้ำตาลทอง และ yellow corn flour ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีเหลืองเขียว (greenish-yellow) (33)

2. อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ทอด ถ้าใช้อุณหภูมิและเวลานานเกินไป ทำให้เกิดปฏิกิริยา caramelization มาก จนผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีน้ำตาลเข้มซึ่งผู้บริโภคไม่ยอมรับ

3. องค์ประกอบของน้ำมันที่ใช้ทอด มีรายงานการศึกษาพบว่า อาหารที่ชุบขนมปังปิ้งซึ่งทอดในน้ำมันถั่วเหลืองจะมีสีดีกว่าทอดในน้ำมันถั่วลิสงเมื่อเริ่มต้นใช้น้ำมัน



แต่หลังจากให้ความร้อนน้ำมันไป 16 ชั่วโมง พบว่าสีของผลิตภัณฑ์ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ซึ่งยังไม่สามารถอธิบายเหตุผลเกี่ยวกับเรื่องนี้ได้อย่างแน่ชัด (33)

## 2.5 การเปลี่ยนแปลงของน้ำมันในระหว่างการทอด (33)

ในระหว่างการทอด น้ำมันจะได้รับสภาวะที่รุนแรง เช่น ความร้อนและความชื้นสูง เป็นการเพิ่มการสัมผัสกับอากาศและสารปนเปื้อนต่างๆ เช่น ชิ้นส่วนของอาหารซึ่งสภาวะเหล่านี้ เป็นการกระตุ้นการสลายตัวของไขมันที่ใช้ทอด ปฏิกริยาสำคัญที่เกิดขึ้นในระหว่างการทอดซึ่งมีผลต่อการสลายตัวของน้ำมัน มีดังนี้

1. ไฮโดรไลซิส (hydrolysis) เกิดขึ้นเมื่อน้ำจากอาหาร และแป้งชุปทอดทำปฏิกริยากับโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ เมื่อมีความร้อน ทำให้เกิดการแตกไขมันอิสระซึ่งมีผลทำให้จุดควัน (smoking point) ต่ำลงและเกิดกลิ่นรส (off-flavour) ที่ไม่ต้องการ นอกจากนี้ การไฮโดรไลซิส ยังทำให้เกิดโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และกลีเซอรินอิสระซึ่งทำให้เกิดควันที่อุณหภูมิต่ำลง และลดแรงตึงผิว (surface tension) ระหว่างไขมันและอาหาร ทำให้การดูดซับน้ำมันมากขึ้น

2. ออกซิเดชัน (oxidation) เป็นปฏิกริยาระหว่างน้ำมันกับออกซิเจนในอากาศ ผลหลักที่เกิดจากการออกซิเดชันคือ เกิดสีดำ (darken-colour) และกลิ่นรสที่ไม่ต้องการ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันในระหว่างการทอด คือ ปริมาณของน้ำมันที่ได้รับความร้อนต่อหน่วยของพื้นผิวที่สัมผัสกับออกซิเจน และการมีสารปนเปื้อน เช่น ชิ้นส่วนของอาหาร หรืออิมัลชันของโลหะโดยเฉพาะเหล็กและทองแดง

3. โพลีเมอไรเซชัน (polymerization) เป็นขบวนการสลายตัวซึ่งช้าที่สุดที่มีผลต่อน้ำมันที่ทอด การโพลีเมอไรเซชันภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิสูงๆ ทำให้โมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์มาเชื่อมกันเกิดเป็นโพลีเมอร์ ทำให้น้ำมันมีลักษณะยางเหนียว (gumming) และสีเข้มขึ้น

น้ำมันที่ใช้ในการทอด นอกจากเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนให้แก่ชิ้นอาหาร แล้วยังเป็นส่วนผสมของอาหาร ซึ่งเกิดจากการดูดซับน้ำมันระหว่างการทอด โดยเฉพาะทอดแบบ deep-fat frying ซึ่งต้องใช้สภาวะที่รุนแรงคือ ใช้อุณหภูมิสูงและเวลานาน นอกจากนี้ยังมีการนำน้ำมันกลับมาใช้ใหม่ ดังนั้น จึงต้องพิจารณาเลือกชนิดของน้ำมันให้เหมาะสม ให้มีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์น้อยที่สุด จุดสำคัญในการเลือกน้ำมันคือ จุดควันของน้ำมัน เพราะน้ำมันที่ใช้ทอดต้องไม่สลายตัวเป็นควันก่อน ดังนั้นจึงควรเลือกใช้น้ำมันที่มีจุดควันสูง เพราะสามารถใช้อุณหภูมิในการทอดได้สูงตามต้องการ ซึ่งทำให้การดูดซับน้ำมันลดลง และน้ำมันเกิดการสลายตัวช้าลง นอกจากนี้ ยังต้องคำนึงถึงกลิ่นรสของน้ำมัน ซึ่งมีผลต่อผลิตภัณฑ์ รวมทั้งพิจารณาค่าทางโภชนาการและราคา



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย