

บทที่ 2

ผลงานวิจัยและงานเขียนอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้าวสินิล

2.1.1 ลักษณะทั่วไปและคุณค่าทางโภชนาการของข้าวสินิล

ข้าวสินิล (Sinin rice) เป็นข้าวพันธุ์ลูกผสมระหว่างข้าวหอมนิลและข้าวหอมมะลิ ได้รับการวิจัยและปรับปรุงพันธุ์โดย ดร.อภิชาติวรรณ วิจิตร ผู้อำนวยการหน่วยปฏิบัติการค้นหาและใช้ประโยชน์ยีนข้าว ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพทางการเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน โดยเริ่มแรกมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ได้วิจัยพันธุ์ข้าวหอมนิลจนได้สายพันธุ์ที่หนึ่ง แล้วจึงทำการผลิตเมล็ดพันธุ์คุณภาพดีแจกจ่ายไปให้กับเกษตรกรและถ่ายทอดสู่ภาคเอกชน ต่อมาจึงได้มีการปรับปรุงพันธุ์ข้าวเจ้าหอมนิลในรุ่นที่ 2 โดยเป็นการคัดเลือกระหว่างข้าวหอมมะลิพันธุ์ 105 กับข้าวเจ้าหอมนิล นำไปสู่การขยายพันธุ์จนได้ข้าวสินิล แต่เมล็ดข้าวสินิลไม่ได้ถูกถ่ายทอดให้กับเอกชนเหมือนกับข้าวพันธุ์หอมนิล เนื่องจากนักวิจัยเกรงว่าอาจจะทำให้สายพันธุ์เปลี่ยนแปลงและด้อยคุณภาพลง จึงได้รวมกลุ่มนักวิจัยเพื่อตั้งบริษัทขึ้นมาเองโดยใช้ชื่อว่า บริษัท สินิลไรซ์ จำกัด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อขยายพันธุ์และส่งเสริมให้เกษตรกรจำหน่ายสินค้าแปรรูปจากข้าวสินิล (บริษัท สินิลไรซ์ จำกัด, 2550)

ข้าวสินิลเป็นข้าวสายพันธุ์ที่ให้ผลผลิตได้สูง โดยเฉลี่ยประมาณ 750 กิโลกรัมต่อไร่ มีลำต้นตั้งตรง กอสวย และมีเมล็ดเรียวยาว สีม่วงเข้ม มีกลิ่นหอม ใช้เวลาปลูกประมาณ 90-110 วัน และเมื่อนำไปหุงสุกข้าวที่ได้จะมีความนุ่มและนิ่ม (หนังสือพิมพ์คมชัดลึก, 2550) และที่สำคัญคือ ข้าวสินิลเป็นข้าวที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยมีโปรตีนร้อยละ 10-12.5 อะไมโลสร้อยละ 12-13 มีแคลเซียม ธาตุเหล็ก และธาตุสังกะสีประมาณ 4.2, 2.25-3.25 และ 2.9 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ (บริษัท สินิลไรซ์ จำกัด, 2550) ซึ่งธาตุเหล็กที่มีอยู่ในข้าวสินิลนั้น จัดว่าเป็นปริมาณที่สูง โดยสูงกว่าข้าวในท้องตลาดถึง 30 เท่า (หนังสือพิมพ์คมชัดลึก, 2550) โดยธาตุเหล็กจะช่วยให้การทำงานของสมองดีขึ้นด้วยการเข้าไปช่วยสร้างเม็ดเลือดแดง ป้องกันโรคโลหิตจาง อ่อนเพลีย สมองล้า และหากสตรีมีครรภ์บริโภคจะช่วยให้ทารกในครรภ์มีพัฒนาการของสมองดี (หนังสือพิมพ์กรุงเทพธุรกิจออนไลน์, 2550) นอกจากนี้ข้าวสินิลยังมีปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) สูง ประมาณ 293 ไมโครโมลต่อกรัม ในส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ดที่เป็นสีม่วงเข้มประกอบไปด้วยสาร anthocyanin, proanthocyanidin, bioflavonoids และวิตามินอี

ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระและดีต่อสุขภาพตามธรรมชาติ ในส่วนของรำและจมูกข้าวมีวิตามินอี วิตามินบี และกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง ในส่วนของรำมีน้ำมันรำข้าวร้อยละ 18 เป็นองค์ประกอบ ซึ่งร้อยละ 80 เป็นชนิด C 18:1 และ C 18:2 เหมือนกับน้ำมันที่ได้จากถั่วเหลืองและข้าวโพด และพบว่ามีสาร omega-3 ประมาณร้อยละ 1-2 รำข้าวของข้าวสาลีมีปริมาณเส้นใยที่ย่อยได้ (digestible fiber) สูงถึงร้อยละ 10 จากข้อมูลทางโภชนาการนับได้ว่าข้าวสาลีเป็นข้าวที่มี ศักยภาพสูง เหมาะในการนำมาแปรรูปทางอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ผลิตภัณฑ์อาหารจากแป้ง ข้าวสาลี รวมทั้งขนมขบเคี้ยวต่างๆ (บริษัท สีนัลไรซ์ จำกัด, 2550) ปริมาณองค์ประกอบของ สารอาหารในข้าวสาลีเปรียบเทียบกับข้าวขาวหอมมะลิ 105 แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณองค์ประกอบของสารอาหารในข้าวสาลีเทียบกับข้าวขาวหอมมะลิ 105

สารอาหาร	ข้าวสาลี	ข้าวขาวหอมมะลิ 105
โปรตีน (ร้อยละ)	12.56	6.0
คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ)	70.0	80.0
ธาตุเหล็ก (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)	3.26	- *
สังกะสี (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)	2.9	- *
แคลเซียม (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)	4.2	- *
โพแทสเซียม (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)	339.4	- *
ทองแดง (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)	0.1	- *

* - คือ ไม่มีการรายงานค่า

ที่มา: บริษัท สีนัลไรซ์ จำกัด (2550)

2.1.2 สารต้านอนุมูลอิสระในข้าวสาลี (บริษัท สีนัลไรซ์ จำกัด, 2550)

ข้าวสาลีมีเมล็ดสีม่วงดำ ซึ่งประกอบไปด้วยสีม่วงเข้ม (cyanidin) สีชมพูอ่อน (peonidin) และสีน้ำตาล (procyanidin) ผสมกัน สีที่เห็นนั้นเป็นสารประกอบกลุ่ม flavonoids ที่เรียกว่า สารแอนโทไซยานิน (anthocyanin) และสารโปรแอนโทไซยานิน (proanthocyanidin) ซึ่งสารดังกล่าวทั้งหมดนี้เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) ที่ทำหน้าที่จับกับอนุมูลอิสระแล้ว ช่วยทำให้กลไกการทำงานของร่างกายมีประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าปกติ นอกจากนี้ในส่วนของ รำข้าวยังอุดมไปด้วยสาร γ -oryzanol ที่สกัดได้จากน้ำมันรำข้าว ซึ่งมีโครงสร้างหลักอยู่ 3 ชนิด คือ 24-methylene cycloartanyl ferulate, cycloartenyl ferulate, และ campesteryl ferulate ซึ่งสาร

ทั้งหมดข้างต้นจัดเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพ (super antioxidant) ที่ช่วยร่างกายมนุษย์ในการป้องกันโรคร้ายที่สำคัญต่างๆ ทำให้มีสุขภาพดี ร่างกายแข็งแรง และดูอ่อนกว่าวัย

2.1.2.1 แอนโทไซยานิน

สารแอนโทไซยานินเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) ที่ทำงานได้ดีกว่าวิตามินอีถึง 5 เท่า เมื่อร่างกายได้รับสารนี้เพียงพอที่จะไปทำหน้าที่จับกับสารอนุมูลอิสระ (free radical) ที่ไปรบกวนระบบการทำงานของเซลล์ในร่างกาย จะทำให้ร่างกายแข็งแรง มีสุขภาพดี รวมทั้งลดริ้วรอยอันเกิดก่อนวัย ช่วยบำรุงผิวพรรณ สารแอนโทไซยานินมีส่วนช่วยในการป้องกันระบบต่างๆ ของร่างกายไม่ให้เกิดความเสียหายจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้แก่

1. ระบบเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (connective tissue)

เมื่อเกิดการอักเสบของแผล จะทำให้เอนไซม์ในเส้นเลือดฝอยเสียหาย ทำให้เลือดไหลเข้าสู่เนื้อเยื่อมาก เนื้อเยื่อจะบวมซ้ำ มีสีดำ และทำให้ผนังหลอดเลือดเสียหาย ซึ่งสารแอนโทไซยานินจะเข้าไปทำหน้าที่ทำให้เอนไซม์ที่เสียหายเกิดสภาวะเป็นกลาง (neutralize) ในเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน และจะสะสมอนุภาคของสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดจากการที่เนื้อเยื่ออักเสบ สุดท้ายจึงทำหน้าที่ซ่อมแซมโปรตีนที่บริเวณผนังหลอดเลือด

2. ระบบประสาท (nervous system)

ในสมองซึ่งได้รับผลกระทบจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้ได้รับความเสียหาย กล่าวคือสาร peroxynitrite จะทำปฏิกิริยา nitration กับกรดอะมิโน tyrosine ในเอนไซม์และโปรตีน ซึ่งเชื่อว่าเป็นสาเหตุหลักของโรคเส้นประสาทในสมองเสื่อม กรดอะมิโน tyrosine ที่ถูก nitrate แล้ว จะไปยับยั้งการทำงานของ nerve growth-factor receptor site สารแอนโทไซยานินจะช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยา tyrosine nitration ได้

3. เส้นเลือดใหญ่ (large blood vessels)

สารแอนโทไซยานินสามารถต่อสู้กับอนุภาค superoxide ที่เป็นสาเหตุหนึ่งของโรคความดันโลหิตสูง (atherosclerosis) โดยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ low-density lipoprotein (LDL) และปกป้องเซลล์ endothelial ที่เส้นเลือด จากการกระตุ้นให้เซลล์เม็ดเลือดขาวเคลื่อนย้ายเข้ามาสู่บริเวณนี้ นอกจากนี้สารแอนโทไซยานินยังช่วยผ่อนคลายเส้นเลือด

4. เส้นเลือดฝอย (small blood vessels)

สารแอนโทไซยานินช่วยทำให้ microcapillary แข็งแรง โดยทำการ stabilizing ที่ capillary wall

มีรายงานวิจัยในประเทศญี่ปุ่น พบว่า การให้สารแอนโทไซยานินในสัตว์ทดลองสามารถกระตุ้นให้ขนงอกกลับคืนมาเร็วกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับสัตว์ทดลองที่ไม่ได้ใช้สารถึง 1 เท่า การศึกษาในห้องปฏิบัติการยืนยันว่า สารแอนโทไซยานินช่วยกระตุ้นให้เซลล์รากผมสร้างผมมากขึ้นถึง 3 เท่า นอกจากนี้สารแอนโทไซยานินยังช่วยให้ผิวหนังดูอ่อนกว่าวัย ลดความเสียหายของผิวหนังที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยแสงอัลตราไวโอเลต วิธีการหนึ่งที่ช่วยชะลอความเสื่อมถอยของผิวหนัง คือ การใช้ครีมกันแดดที่ผสมสารต้านอนุมูลอิสระ ในการทดลองพบว่า การใช้แอนโทไซยานินจากเมล็ดองุ่นช่วยป้องกันไม่ให้เกิดอนุมูลอิสระได้เทียบเท่ากับวิตามินอี โดยป้องกันกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยแสงอัลตราไวโอเลต ในการทดลองเดียวกัน พบว่า รังควัตถุชนิดนี้เมื่อใช้ร่วมกับวิตามินอีจะช่วยให้ทำงานได้ดีขึ้น เพราะขบวนการเสื่อมถอยของผิวหนังยังมีสาเหตุเนื่องมาจากการปลดปล่อยเอนไซม์ elastase จากการอักเสบของผิวหนังที่ถูกทำลายโดยแสงแดด สารแอนโทไซยานินจะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการปลดปล่อย elastase จึงทำให้ elastin ยังคงอยู่ในผิวหนัง ช่วยทำให้ผิวหนังไม่เสื่อมถอยลง

นอกจากนี้สารแอนโทไซยานินยังช่วยลดความเสี่ยงจากการป่วย ได้แก่ เบาหวาน (diabetes) และมะเร็ง (cancer) ได้ และยังช่วยบำรุงสายตาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการมองเห็นเวลามองตอนกลางคืน โดยในประเทศฝรั่งเศสมีการทดสอบให้อาสาสมัคร 36 คนรับประทานสารแอนโทไซยานินที่สกัดจากลูกบลูเบอร์รี่ พบว่า ภายในช่วง 24 ชั่วโมง หลังจากรับประทานสารนี้เข้าไป สายตาสามารถมองเห็นในเวลากลางคืนได้ดีขึ้น

2.1.2.2 โปรแอนโทไซยานิน

มีรายงานวิจัยพบว่าสารโปรแอนโทไซยานิน หรือที่เรียกว่าสาร condensed tannins มีสมบัติในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระได้ดีกว่าวิตามินซี วิตามินอี และเบต้าแคโรทีน (beta-carotene) สารโปรแอนโทไซยานินช่วยยับยั้งการเกิดโรค atherosclerosis โดยไปยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันใน low-density lipoproteins (LDL) ซึ่งทำความเสียหายให้เซลล์ที่ผนังเส้นเลือด ก่อให้เกิดการอักเสบ ทำให้เซลล์ smooth muscle เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเกิดกลไกการจับตัว (clotting) ซึ่งเป็นสาเหตุนำไปสู่โรค atherosclerosis สารโปรแอนโทไซยานินสามารถป้องกันการเกิดมะเร็ง โดยจะไปฆ่าเซลล์มะเร็ง ยับยั้งไม่ให้เซลล์มะเร็งเจริญเติบโตได้ ทั้งในโพรงจมูก ปอด กระเพาะอาหาร และเซลล์เม็ดเลือดขาว นอกจากนี้สารโปรแอนโทไซยานินยังช่วยป้องกันไวรัสได้ โดยจากการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่า สามารถฆ่าไวรัส HSV-1 และมีรายงานว่าสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ reverse transcriptase ในไวรัส HIV ได้อีกด้วย

นอกจากจะช่วยป้องกันโรคแล้ว สารโปรแอนโทไซยานินยังมีรสหวานกว่าน้ำตาลถึง 35 เท่า ผู้ที่ต้องการควบคุมระดับน้ำตาลเมื่อรับประทานเข้าไปแล้ว จะเข้าไปบำรุงผิวพรรณให้ดูอ่อนกว่าวัย เพราะลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่จะทำให้ผิวพรรณเหี่ยวเฉา และที่น่าสนใจอีกอย่างคือ ลดผลกระทบจากรังสีอัลตราไวโอเลต คือ ทำหน้าที่เป็นครีมกันแดด และทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ทำให้มีสุขภาพที่ดีและยังเพิ่มความงามได้อีกด้วย และมีรายงานว่าสารนี้ยังช่วยบำรุงเส้นผมให้มีเส้นหนา ดก และมีสุขภาพผมที่ดี

2.1.2.3 γ -oryzanol

สาร γ -oryzanol เป็นสารที่สกัดได้จากน้ำมันรำข้าว มีปริมาณ 3,000 mg/kg มากกว่าวิตามินอีซึ่งมีปริมาณเพียง 300 mg/kg มีรายงานว่าสาร γ -oryzanol ช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเป็นผลผลิตจากคอเลสเตอรอลที่อาจก่อให้เกิดสารประกอบที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม (mutagenic) และสารก่อมะเร็ง (carcinogenic) ซึ่งสารเหล่านี้เป็นอันตรายต่อเซลล์ต่างๆ ในหลอดเลือด เป็นสาเหตุของโรคเส้นเลือดอุดตันในหัวใจ นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าสารนี้ช่วยป้องกันการเกิดมะเร็งและโรคหัวใจได้

2.2 แป้งข้าว

แป้งข้าว ตามความหมายของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2529) ระบุว่าเป็นแป้งที่ได้จากข้าวขาว อาจเป็นข้าวเต็มเมล็ด ข้าวหัก หรือปลายข้าว ซึ่งได้จากการสีข้าวเปลือกที่มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Oryza sativa* L.

แป้งข้าวนับเป็นผลิตภัณฑ์จากข้าวในขั้นการแปรรูปปฐมภูมิหรือการแปรรูปขั้นต้น ยังไม่สามารถนำมาบริโภคได้โดยตรง จะต้องนำแป้งข้าวไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร กึ่งอาหาร และไม่ใช่อาหารต่อไป การผลิตแป้งข้าวเริ่มโดยใช้เมล็ดข้าวเต็ม หรือที่นิยมใช้คือ ข้าวหักที่มีความยาวตั้งแต่ 5 ส่วนขึ้นไป หรือข้าวหักที่มีความยาวไม่ถึง 6.5 ส่วน และไม่ผ่านตะแกรงเบอร์ 7 นำมาทำความสะอาดด้วยชุดเครื่องทำความสะอาด เช่นเดียวกับการทำความสะอาดข้าวเปลือกและข้าวสารรวมกัน ได้แก่ การผ่านเครื่องแยกแม่เหล็ก เครื่องแยกหิน และเครื่องขัดขาว เพื่อขัดผิวข้าวหักให้สะอาด (อรอนงค์, 2547) จากนั้นจึงนำไปผ่านขั้นตอนการโม่ให้เป็นแป้ง ซึ่งทำได้ 3 วิธี (งามชื่น, 2537) ดังนี้

1. การโม่เปียกหรือการโม่น้ำ

เป็นวิธีการผลิตแป้งที่แพร่หลายในปัจจุบัน การผลิตเริ่มจากการนำปลายข้าวมาแยกสิ่งสกปรก อาจมีการสีขัดเอาผิวนอกของเมล็ดออก เพื่อขัดผิวนอกที่มีกลิ่นหืนออกไป

ขั้นตอนต่อไปจึงนำเมล็ดข้าวมาแช่น้ำ จะมีการกวนข้าวเพื่อให้สิ่งเจือปนลอยขึ้นมาและตักออก การล้างข้าวนี้จะล้างหลายๆ ครั้งจนน้ำที่ล้างใส หลังจากนั้นจึงทำการแช่ข้าวต่อไปเพื่อให้ข้าวดูดซับน้ำไว้ ทำให้ข้าวอ่อนตัวลง ซึ่งอาจใช้เวลา 3-4 ชั่วโมง แล้วจึงระบายน้ำออกให้ข้าวสะเด็ดน้ำ หลังจากนั้นจึงนำข้าวเข้าเครื่องโม่พร้อมกับน้ำ โดยควบคุมอัตราการเติมน้ำให้เหมาะสมเพื่อให้ได้แป้งละเอียดตามต้องการ น้ำแป้งที่ได้จะเข้าสู่ระบบการกรองหรือเครื่องแยกน้ำแป้ง ในปัจจุบันโรงงานผลิตแป้งนิยมใช้เครื่องกรองระบบ filter plate หลังจากการกรองน้ำออกแป้งหมดจะค้างอยู่ในชั้นของแผ่นกรองเป็นก้อน จากนั้นจึงนำก้อนแป้งที่ได้ไปเข้าเครื่องตี เพื่อทำให้มีขนาดเล็กลง แล้วจึงนำไปอบเพื่อลดความชื้น ในสมัยก่อนการลดความชื้นมักใช้แสงแดด ซึ่งต้องใช้เวลานาน และแป้งมักมีกลิ่นเปรี้ยวซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการหมัก ปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมนิยมใช้ระบบการเป่าด้วยลมร้อนอุณหภูมิสูง ซึ่งประหยัดเวลาและได้แป้งที่มีคุณภาพดีขึ้น การใช้อุณหภูมิจะทำให้ผิวหนังด้านนอกของก้อนแป้งสุกบางส่วน (gelatinized) ทำให้คุณภาพของแป้งแตกต่างจากแป้งที่ได้จากวิธีการโม่แห้งซึ่งเป็นแป้งดิบ เมื่อลดความชื้นของแป้งลงถึงระดับที่ต้องการ (ประมาณร้อยละ 9-10) จึงนำแป้งแห้งนี้ไปโม่อีกครั้งให้ละเอียดเป็นผง และร่อนให้มีความละเอียดตามต้องการ แป้งที่ผ่านการผลิตโดยวิธีนี้เป็นแป้งที่มีคุณภาพดี มีความละเอียดและมีสิ่งเจือปนน้อย แต่อาจสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการไปกับน้ำที่ล้างและน้ำที่ใช้ในตอนโม่ได้

2. การโม่แห้ง

เนื่องจากวัตถุดิบที่นิยมใช้มักเป็นปลายข้าว ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าว ดังนั้นจึงมักมีสิ่งเจือปนอยู่มาก การแยกสิ่งเจือปนอาจใช้วิธีร่อนแป้งเพื่อแยกสิ่งที่มีน้ำหนักเบากว่าข้าวออก แต่เนื่องจากปลายข้าวมีขนาดค่อนข้างเล็ก จึงยังคงมีสิ่งเจือปนเหลือค้างอยู่ ดังนั้นแป้งที่ได้จึงมีความสะอาดน้อย เมล็ดข้าวยังมีความแกร่งอยู่มาก ทำให้ลำบากที่จะทำให้แตกละเอียด แป้งที่ได้จากการโม่แห้งจึงมักเป็นแป้งหยาบ นอกจากนี้ไขมันที่ยังเหลือในเมล็ดข้าวอาจเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดกลิ่นเหม็นหืนง่าย ในประเทศไทยจึงไม่ค่อยนิยมใช้แป้งข้าวชนิดโม่แห้ง อย่างไรก็ตามแป้งที่ได้การโม่ด้วยวิธีนี้ยังคงมีคุณค่าทางโภชนาการหลงเหลืออยู่มากกว่าการโม่เปียก ในต่างประเทศมีรายงานการใช้แป้งชนิดนี้ในการทำขนมเค้กและขนมปังกรอบ

3. การโม่ผสม

เริ่มกระบวนการผลิตโดยการทำความสะดวก ล้าง และแช่ข้าวเช่นเดียวกับกับวิธีการโม่เปียก หลังจากนั้นจึงนำข้าวดิบที่มีความชื้นมาอบที่ระดับอุณหภูมิสูงเพื่อทำให้ข้าวสุกและลดความชื้นลงจนมีระดับความชื้นต่ำ (ร้อยละ 9-10) ต่อจากนั้นจึงนำข้าวสุกไปตีให้แตกเป็นก้อนเล็กๆ แล้วจึงนำไปโม่ละเอียด จากนั้นจึงร่อนแป้งให้มีความละเอียดตามต้องการ แป้งที่ได้จะมีความละเอียดน้อยกว่าการโม่เปียก เพราะเมล็ดข้าวสุกแห้งจะมีความแข็งมาก แต่การนึ่งข้าวที่

ความร้อนสูงจะช่วยทำลายเอ็นไซม์ไลเปส ซึ่งจะทำให้เกิดกรดไขมันอิสระและเป็นสาเหตุของการเกิดกลิ่นหืนได้ ดังนั้นแป้งที่ได้จึงเป็นแป้งคุณภาพสูง ในปัจจุบันนิยมใช้ในการผลิตแป้งข้าวเหนียวสำหรับทำขนมโก๋

Nishita และ Bean (1979) ได้ทดลองเตรียมแป้งข้าวเจ้าด้วยวิธีการไม่แห้ง โดยนำข้าวสารมาบดด้วยเครื่องบดเมล็ดกาแฟ แล้วบดต่อให้ละเอียดด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ พบว่าแป้งข้าวเจ้าที่เตรียมได้มีความละเอียดใกล้เคียงกับแป้งสาลี โดยแป้งส่วนใหญ่สามารถร่อนผ่านตะแกรง 100 เมช ได้ อย่างไรก็ตามการบดข้าวเจ้าให้เป็นแป้งที่มีขนาดเล็กสม่ำเสมอเหมือนกับแป้งสาลีนั้นทำได้ยาก แต่มีการวิจัยพบว่า ความละเอียดของแป้งข้าวเจ้ามีผลน้อยมากต่อคุณภาพของขนมปัง (Tanaka, 1972)

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2529) ได้กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแป้งข้าว โดยมีสาระสำคัญบางประการ คือ แป้งข้าวต้องเป็นผงละเอียด ไม่จับกัน เป็นก้อน ส่วนที่ค้ำบนตะแกรง 180 ไมโครเมตร ต้องไม่เกินร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก ต้องมีสีขาวหรือสีขาวนวล มีกลิ่นตามธรรมชาติของแป้งข้าว ไม่มีกลิ่นอับ หืน เหม็นเปรี้ยว หรือกลิ่นไม่พึงประสงค์อื่นๆ และต้องปราศจากสิ่งปลอมปน สำหรับคุณลักษณะอื่นๆ ที่กำหนดเกณฑ์ไว้แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะที่ต้องการของแป้งข้าว

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด
ความชื้น	ไม่เกินร้อยละ 13.0
สตาร์ช (น้ำหนักแห้ง)	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 85.0
ความเป็นกรด-เบส	5.0 ถึง 7.0
เถ้า (น้ำหนักแห้ง)	ไม่เกินร้อยละ 0.50
เถ้าที่ไม่ละลายในกรด (น้ำหนักแห้ง)	ไม่เกินร้อยละ 0.030
อะไมโลส (น้ำหนักแห้ง)	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 15.0

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2529)

เมื่อนำแป้งข้าวมาส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง จะพบเม็ดสตาร์ชขนาดเล็กประมาณ 2-9 ไมโครเมตร มีรูปทรงเป็นเหลี่ยมกระจายตัวอยู่และบางส่วนจับตัวกันเป็นกลุ่ม โดยแต่ละเม็ดสตาร์ช จะมีโครงสร้างทางเคมีที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสเกาะกัน

เป็นสายโซ่ยาวเรียกว่า อะไมโลส (amylose) หากน้ำตาลกลูโคสมาเกาะเกี่ยวในรูปที่มีกิ่งก้านที่แตกแขนงออกไปคล้ายกิ่งไม้ จะเรียกพอลิเมอร์นี้ว่า อะไมโลเพคติน (amylopectin) ซึ่งพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้จะเกาะเกี่ยวกันอย่างแน่นหนาด้วยพันธะไฮโดรเจน สัดส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจะแตกต่างกันไปตามชนิดของแป้ง ในกรณีของแป้งข้าวมีรายงานว่า อัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่ต่างกันของข้าว จะส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของแป้งนั้น และเป็นปัจจัยที่ผู้ใช้แป้งข้าวเป็นวัตถุดิบจะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสม จึงจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีตามต้องการ (สายสนม, 2537)

แป้งข้าวสามารถจำแนกได้เป็น 4 ชนิด ตามปริมาณอะไมโลส (Juliano, 1984) ดังนี้

1. แป้งข้าวจากข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำมาก (waxy)

มีร้อยละของน้ำหนักแห้งของอะไมโลสที่เป็นองค์ประกอบเท่ากับ 0-2 นิยมใช้ในการทำขนมหวานและน้ำสลัด

2. แป้งข้าวจากข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ

มีร้อยละของน้ำหนักแห้งของอะไมโลสที่เป็นองค์ประกอบเท่ากับ 9-20 นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารสำหรับเด็ก อาหารเช้า และขนมปังที่ใช้เชื้อยีสต์เพื่อขึ้นฟู

3. แป้งข้าวจากข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสปานกลาง

มีร้อยละของน้ำหนักแห้งของอะไมโลสที่เป็นองค์ประกอบเท่ากับ 20-25 ในประเทศฟิลิปปินส์นิยมใช้ในการทำเค้กที่ต้องมีการหมัก (fermented rice cake) และซูประบ้อง

4. แป้งข้าวจากข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูง

มีร้อยละของน้ำหนักแห้งของอะไมโลสที่เป็นองค์ประกอบมากกว่า 25 นิยมใช้ในการทำเส้นก๋วยเตี๋ยว

2.3 แป้งสาลี

แป้งสาลีผลิตได้จากการนำเมล็ดข้าวสาลีมาไม่ด้วยวิธีการไม่แห้ง และทำความสะอาดโดยการดักกรองผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ แป้งฟลาว (wheat flour) ซึ่งอุดมไปด้วยโปรตีน เกลลือแร่ เหมาะสำหรับทำอาหาร เช่น ขนมปังต่างๆ แต่ถ้าจะผลิตเป็นแป้งสตาร์ช (starch) จะต้องใช้น้ำเป็นตัวกลางแยกสิ่งปลอมปนอื่นๆ ได้แก่ ไขมัน และโปรตีนออกจากแป้งฟลาว (กล้านรงค์ และเกื้อกูล, 2543)

ข้าวสาลีที่นำมาไม่แป้งสาลีมี 2 ประเภท คือ ข้าวสาลีชนิดแข็ง เมื่อนำมาไม่จะได้แป้งสาลีชนิดแข็งซึ่งเป็นแป้งที่มีโปรตีนสูง เหมาะสำหรับใช้ในการทำขนมอบ เช่น ขนมปัง

แป้งสาลีชนิดนี้มีโปรตีนที่มีคุณภาพดี สามารถนวดผสมให้ได้ก้อนแป้งที่มีความยืดหยุ่นดี ทนต่อสภาพการผสม การหมัก อุณหภูมิของห้องและเครื่องผสม มีคุณสมบัติในการอุ้มน้ำที่ดี เป็นผลให้ขนมอบมีปริมาตรดี มีความสามารถดูดซึมน้ำได้สูง เหมาะสำหรับการทำขนมปัง เคนนิชเพสตรี ส่วนข้าวสาลีอีกประเภทหนึ่ง คือ ข้าวสาลีชนิดอ่อน เมื่อนำข้าวมาไม่จะได้แป้งสาลีชนิดอ่อน ซึ่งเป็นแป้งที่มีโปรตีนต่ำ มีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้ต่ำกว่าแป้งชนิดแข็ง มีความทนทานต่อการผสมและการหมักที่ต่ำ จึงเหมาะสำหรับนำมาทำเค้ก คุณก็ สำหรับแป้งสาลีที่มีขายอยู่ทั่วไปในท้องตลาดสามารถแบ่งได้ 3 ชนิด (ทิพาวรรณ, 2550) ดังนี้

1. แป้งขนมปัง

มีโปรตีนสูงประมาณร้อยละ 12-14 เหมาะสำหรับการทำขนมปังหรือผลิตภัณฑ์ที่หมักด้วยยีสต์ แป้งสาลีชนิดนี้ไม่จากข้าวสาลีชนิดแข็ง ลักษณะของแป้งจะหยาบ มีสีครีมไม่ขาว ตัวที่ทำให้แป้งขึ้นฟู ได้แก่ ยีสต์

2. แป้งอเนกประสงค์

แป้งชนิดนี้มีโปรตีนปานกลางประมาณร้อยละ 10-12 เหมาะสำหรับการทำคุกกี้ เพสตรี ปาท่องโก๋ บะหมี่ เป็นแป้งที่ได้จากการผสมแป้งสาลีชนิดแข็งกับแป้งสาลีชนิดอ่อน เข้าด้วยกันในสัดส่วนที่เหมาะสม มีลักษณะของแป้งขนมปังกับแป้งเค้กรวมกัน ตัวที่ทำให้แป้งขึ้นฟู ได้แก่ ยีสต์และผงฟู

3. แป้งเค้ก

มีโปรตีนต่ำประมาณร้อยละ 7-9 เหมาะสำหรับทำเค้ก คุกกี้ แป้งสาลีชนิดนี้มีลักษณะละเอียด สีขาว ทำให้ขึ้นฟูได้ด้วยสารเคมีเท่านั้น ได้แก่ ผงฟู และโซดาไบคาร์บอเนต

คุณค่าทางอาหารของแป้งสาลีประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนใหญ่ นอกนั้นเป็นโปรตีน ไขมัน แร่ธาตุ ได้แก่ โพแทสเซียม ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม แคลเซียม และวิตามินหลายชนิด เช่น วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 ไนอะซิน เป็นต้น (Pyler, 1988) องค์ประกอบทางเคมีของแป้งสาลี (ปริมาณโดยเฉลี่ย) แสดงดังตารางที่ 2.3

แป้งสาลีเป็นแป้งที่ใช้ทำขนมอบทุกชนิด ไม่มีแป้งชนิดอื่นที่นำมาใช้แทนกันได้ ถึงแทนกันได้บ้างแต่คุณสมบัติจะไม่เหมือนแป้งสาลี ทั้งนี้เพราะแป้งสาลีมีโปรตีนสองชนิดรวมกันอยู่ในสัดส่วนที่เหมาะสม คือ กลูเตนิน และไกลอะดิน (glutenin and gliadin) ซึ่งเมื่อนำแป้งสาลีมาผสมกับน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะทำให้เกิดสารชนิดหนึ่งเรียกว่า กลูเตน มีลักษณะเป็นยางเหนียว ยืดหยุ่นได้ กลูเตนนี้นี้จะเป็นตัวเก็บก๊าซเอาไว้ทำให้เกิดโครงสร้างที่จำเป็นของขนมอบ และจะเป็นโครงสร้างแบบฟองน้ำเมื่อได้รับความร้อนจากเตาอบ

โปรตีนในแป้งสาลีจะดูดซึมน้ำได้อย่างน้อยสองเท่าของน้ำหนักของตัวเอง โดยแป้งสาลีที่มีโปรตีนสูงจะมีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้ดีกว่าแป้งสาลีที่มีโปรตีนต่ำ เมื่อเติมน้ำลงไปแป้งสาลีแล้วนวด โปรตีนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นกลูเตน แป้งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจะถูกเรียกว่า โด ถ้าหมักโดได้ระยะหนึ่งแล้วนำมาล้างน้ำ ส่วนประกอบต่างๆ จะหลุดออกไปเหลือเพียงส่วนที่เรียกว่า กลูเตน ซึ่งเป็นโปรตีนที่ยืดหยุ่นได้และเป็นโครงสร้างของโด กลูเตนจะอุ้มก๊าซที่เกิดจากการหมักไว้ ทำให้โดขึ้นฟู เมื่อนำโดไปอบ ความร้อนขณะอบจะทำให้กลูเตนแข็งตัวและเกิดเป็นโครงสร้างของขนมอบขึ้นมา (ทิพาวรรณ, 2550)

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งสาลี

องค์ประกอบทางเคมี	(ร้อยละ)
สตาร์ช	70.0
ความชื้น	15.0
โปรตีน	11.4
น้ำตาล	1.0
ไขมัน	1.0
แร่ธาตุ	0.4
อื่นๆ	2.0

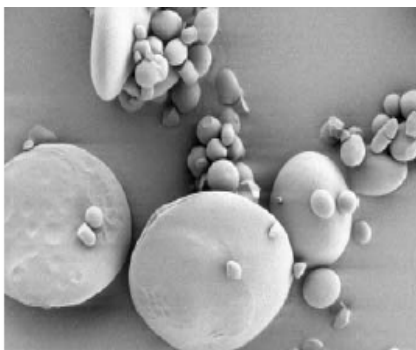
ที่มา: ทิพาวรรณ (2550)

นอกจากการนำแป้งสาลีมาใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ แล้ว ยังมี การนำแป้งสาลีมาใช้เป็นวัตถุดิบในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ไดอัลดีไฮด์สตาร์ช (dialdehyde starch), สตาร์ชแซนไทด์ (starch xanthide) และเป็นวัตถุดิบในการหมักกรดอินทรีย์ อีกมากมาย (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2543)

2.4 สตาร์ช

สตาร์ช (starch) เป็นผลิตภัณฑ์แป้งที่ประกอบด้วยสารอาหารที่เป็นคาร์โบไฮเดรต เป็นส่วนใหญ่ สตาร์ชจัดเป็นองค์ประกอบที่มีอยู่ในแป้งสาลีในปริมาณมากที่สุด เมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูลักษณะของสตาร์ชในแป้งสาลี จะมองเห็นเม็ดสตาร์ช (starch granule)

มีรูปร่างกลมหรือรี มีทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กปนกันอยู่ (ภาพที่ 2.1) เม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยระหว่าง 20-35 ไมครอน และอาจมีขนาดได้ถึง 55 ไมครอน ส่วนเม็ดสตาร์ชขนาดเล็กจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 2-10 ไมครอน (มงคล และคณะ, 2542)



ภาพที่ 2.1 scanning electron micrograph ของสตาร์ชจากข้าวสาลี
ที่มา: Kim และคณะ (2003)

โครงสร้างทางเคมีของสตาร์ช จะประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสต่อกันเป็นสายยาวที่มีขนาดใหญ่ โดยส่วนใหญ่น้ำตาลกลูโคสจะประกอบด้วยโมเลกุล 2 ชนิด ได้แก่ อะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพคติน (amylopectin) ซึ่งอัตราส่วนอะไมโลสและอะไมโลเพคตินของสตาร์ชจากแหล่งที่ต่างกันก็จะแตกต่างกันไป (รุ่งนภา และคณะ, 2546) สมบัติที่สำคัญของอะไมโลสเปรียบเทียบกับอะไมโลเพคตินแสดงดังตารางที่ 2.4

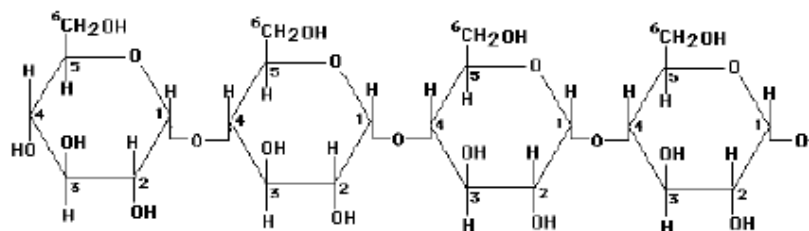
ตารางที่ 2.4 สมบัติที่สำคัญของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน

สมบัติ	อะไมโลส	อะไมโลเพคติน
ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาล กลูโคสเกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาล กลูโคสเกาะกันเป็นกิ่งก้าน
พันธะที่จับ	$\alpha (1 \rightarrow 4)$	$\alpha (1 \rightarrow 4)$ และ $\alpha (1 \rightarrow 6)$
ขนาด	200-2,000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10,000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การคินตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้ จะจับตัวเป็นก้อนและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

ที่มา: Beynum และ Roels (1985)

2.4.1 อะไมโลส

อะไมโลสเป็นโพลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ $\alpha (1 \rightarrow 4)$ glucosidic linkages มีโซ่กิ่ง (branched chain) อยู่ประมาณ 3-4 กิ่ง เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ $\alpha (1 \rightarrow 6)$ glucosidic linkages (อรอนงค์, 2547) โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลสแสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลส

ที่มา: Chaplin (2001)

สตาร์ชจากพืชต่างชนิดกันจะมีปริมาณอะไมโลสที่แตกต่างกัน ในสตาร์ชข้าวสาลีจะมีปริมาณอะไมโลสสูงประมาณร้อยละ 28 ในสตาร์ชข้าวเจ้ามีประมาณร้อยละ 17 สตาร์ชบางชนิดจะมีอะไมโลสต่ำมาก เช่น waxy starch จะมีอะไมโลสน้อยกว่าร้อยละ 1 หรือไม่มีเลย ส่วนสตาร์ช amylo maize มีอะไมโลสสูงมากถึงร้อยละ 80 น้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลสอยู่ในช่วง 10^5 ถึง 10^6 ดาลตัน ซึ่งอะไมโลสในสตาร์ชแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับจำนวนกลูโคสในโมเลกุลของอะไมโลส หรือ degree of polymerization (DP) ในสตาร์ชข้าวสาลีจะมีค่า DP ของอะไมโลสอยู่ในช่วง 200 – 1,200 สตาร์ชที่มีโมเลกุลของอะไมโลสยาวขึ้น จะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ลดลง

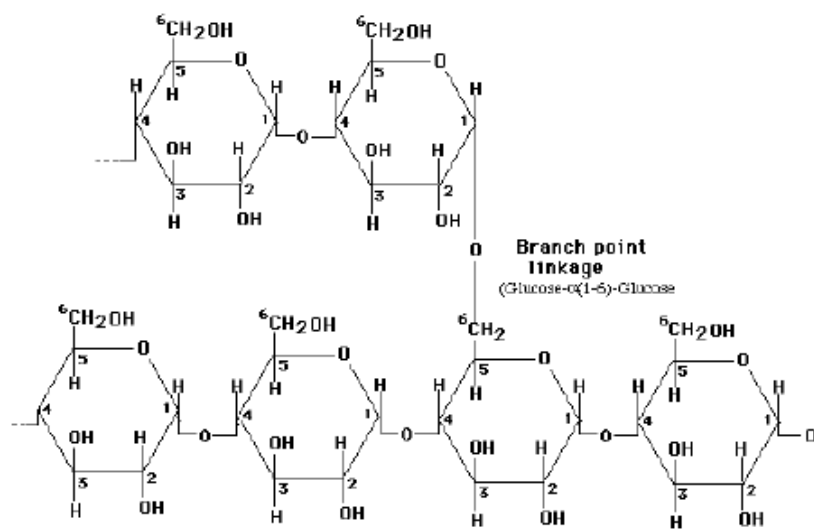
อะไมโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น butanol, fatty acid, phenol และ hydrocarbon สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้จะไม่ละลายในน้ำ โดยอะไมโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารอินทรีย์ นอกจากนี้ อะไมโลสที่รวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงิน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงสตาร์ชที่มีองค์ประกอบของอะไมโลส

ตำแหน่งของอะไมโลสภายในเม็ดสตาร์ชขึ้นอยู่กับชนิดของสตาร์ช อะไมโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะไมโลเพคติน บางส่วนกระจายตัวอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (amorphous) และส่วนผลึก (crystalline) สตาร์ชข้าวสาลีจะพบอะไมโลสกระจายตัวอยู่ในส่วนอสัณฐาน จากการศึกษพบว่า อะไมโลสโดยทั่วไปมักจะอยู่ในส่วนบริเวณรอบนอกเม็ดสตาร์ชมากกว่าที่จะอยู่ในส่วนใจกลางเม็ดสตาร์ช อะไมโลสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่จะพบเป็นเกลียวคู่กับอะไมโลเพคตินบริเวณใจกลางเม็ดสตาร์ช ส่วนอะไมโลสขนาดโมเลกุลเล็กมักพบอยู่ตามขอบเม็ดสตาร์ช

โครงสร้างของอะไมโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ เป็นเกลียวม้วน (helix), เกลียวที่คลายตัว (interrupted helix) หรือม้วนอิสระ (random coil) อะไมโลสภายในเม็ดสตาร์ชมีทั้งที่อยู่ในสภาพอิสระ อยู่ร่วมกับอะไมโลเพคตินเป็นเกลียวคู่ (double helix) ในส่วนผลึกของเม็ดสตาร์ช หรืออาจอยู่ร่วมกับไขมันเป็นโครงสร้าง amylose-lipid complex เกิดเป็นโครงสร้างผลึกอย่างอ่อนที่ไปเสริมความแข็งแรงให้กับเม็ดสตาร์ช ทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวได้ช้าลง (กล้านรงค์ และเกื้อกุล, 2543)

2.4.2 อะไมโลเพคติน

อะไมโลเพคตินเป็นโพลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α (1 $\rightarrow$ 4) glucosidic linkages และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นโพลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มี DP อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α (1 $\rightarrow$ 6) glucosidic linkages โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลเพคตินแสดงดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลเพคติน

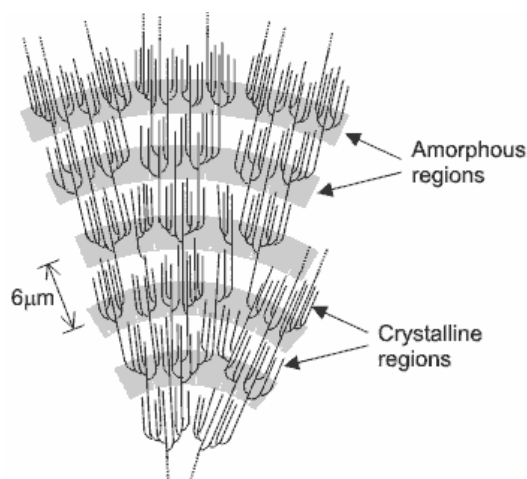
ที่มา: Chaplin (2001)

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะ α (1 $\rightarrow$ 6) glucosidic linkages มีอยู่ประมาณร้อยละ 5 ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะไมโลเพคตินทั้งหมด ในสตาร์ชข้าวสาลีจะมีปริมาณอะไมโลเพคตินประมาณร้อยละ 72 ในสตาร์ชข้าวเจ้ามีประมาณร้อยละ 83 ค่า DP ของอะไมโลเพคตินในสตาร์ชแต่ละชนิดจะมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าอะไมโลสประมาณ 1,000 เท่า คือ ประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน และมีอัตราในการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะไมโลเพคตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง

ขนาดสายโมเลกุลของกิ่งสาขาอะไมโลเพคตินมีตั้งแต่ขนาดเล็ก ซึ่งมี DP ประมาณ 15 หน่วย จนถึงโมเลกุลขนาดใหญ่ซึ่งมี DP ประมาณ 45 หน่วย สายเหล่านี้อยู่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (cluster) โครงสร้างของอะไมโลเพคตินจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนผลึก (crystalline region) และส่วนอสัณฐาน (amorphous region) ที่มีโครงสร้างเป็นกิ่งเชื่อม แสดงดังภาพที่ 2.4

ปริมาณของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่แตกต่างกันทำให้สมบัติของสตาร์ชแต่ละชนิดแตกต่างกันออกไป เช่น แป้ง waxy maize ที่ไม่มีอะไมโลส จะให้สตาร์ชที่มีสมบัติไม่เกิดเจล เกิดการคืนตัวของแป้งน้อย แป้งเปียกมีลักษณะใสและทนต่อการเกิด syneresis ส่วนแป้ง amylo maize ที่มีปริมาณอะไมโลสสูงถึงร้อยละ 70 จะให้สตาร์ชที่มีสมบัติเกิดเจลแข็งได้

เม็ดสตาร์ชพองตัวยาก แบ่งเปื่อยมีลักษณะขุ่น และมีอุณหภูมิการเกิดแบ่งเปื่อยสูง (กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2543)



ภาพที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างของอะไมโลเพคตินที่ประกอบด้วยส่วนผลึก (crystalline region) และส่วนอสัณฐาน (amorphous region)

ที่มา: Chaplin (2007)

2.4.3 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของสตาร์ช

การเปลี่ยนแปลงสมบัติของสตาร์ชเมื่อผสมกับน้ำในขณะที่น้ำยังเย็นอยู่ โดยมีปริมาณน้ำมากกว่าแป้งในสัดส่วนร้อยละ 1-5 เมื่อผสมกันในระยะแรกจะเห็นว่า ส่วนผสมมีลักษณะขาวขุ่น อยู่ในลักษณะแบ่งแขวนลอยในน้ำ แต่ถ้าตั้งทิ้งไว้ระยะหนึ่งพบว่า แป้งตกตะกอน แยกจากส่วนน้ำคล้ายกับแป้งก่อนที่จะผสม แสดงว่าเม็ดสตาร์ชในแป้งไม่ดูดซึมน้ำขณะที่เย็นหรือดูดซึมนได้น้อยมาก เมื่อให้ความร้อนแก่ส่วนผสมน้ำและแป้งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของเม็ดสตาร์ช โดยเกิดการพองตัวอูมน้ำมากขึ้นในขณะที่ยุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนเข้าไปทำให้พันธะไฮโดรเจนที่เกาะเกี่ยวกันเองในบริเวณอสัณฐานของโครงสร้างอะไมโลเพคตินคลายตัวลง ทำให้สามารถจับกับโมเลกุลของน้ำในส่วนผสมหรืออูมน้ำเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ช ทำให้พองขึ้นเรื่อยๆ พร้อมกับเริ่มขึ้นเหนียว เรียกว่าการเกิดเจลลิตไนเซชัน (gelatinization) เม็ดสตาร์ชพองขึ้นได้โดยไม่จำกัดถ้าอยู่ในส่วนผสมที่มีน้ำมาก จนในที่สุดน้ำเข้าไปในบริเวณผลึก ทำลายโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชพร้อมทั้งมีความข้นเหนียวสูงสุด เพราะน้ำเข้าไปอยู่ในเม็ดสตาร์ชจนไม่เหลือเป็นน้ำอิสระในส่วนผสม แต่เมื่อกวนต่อไปเรื่อยๆ ที่อุณหภูมิสูงอีกระยะหนึ่ง ประมาณ 20-30 นาที ความเหนียวจะลดลง เนื่องจากโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย ทำให้โมเลกุลของอะไมโลเพคตินและ

อะไมโลสไหลออกจากเม็ดสตาร์ช และแขวนลอยในส่วนผสม เมื่อตั้งทิ้งไว้ให้เย็นเกิดการคืนตัวหรือรีโทรเกรเดชัน (retrogradation หรือ setback) ส่วนผสมจะมีลักษณะขุ่นกลับคืน และมีความข้นหนืดเพิ่มขึ้นอีกครั้ง

เมื่อตั้งทิ้งไว้อีกระยะอาจจะเห็นน้ำแยกตัวออกจากเม็ดสตาร์ช ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการทำให้เย็นตัวลง โดยถ้าทำให้เย็นตัวลงช้าๆ น้ำจะแยกตัวออกจากโมเลกุลของสตาร์ชได้อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งโมเลกุลของอะไมโลสซึ่งมีสายสั้น เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายมาเกาะเกี่ยวกันเอง ทำให้น้ำแยกตัวออก เกิดการแยกชั้นหรือตกตะกอนแต่น้ำในส่วนโมเลกุลของอะไมโลเพคตินจะอุ้มน้ำไว้ได้ดีกว่า ดังนั้นความสามารถในการอุ้มน้ำของเจลที่ได้จะขึ้นอยู่กับปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่มีอยู่ในเม็ดสตาร์ช แต่ถ้าทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว จะทำให้น้ำที่อะไมโลสและอะไมโลเพคตินอุ้มน้ำไว้ในโครงสร้างไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงช้ามาก (อรอนงค์, 2547)

2.4.3.1 การพองตัว (swelling) และการละลาย (solubility)

น้ำหรือของเหลวชนิดอื่นๆ สามารถแพร่เข้าไปในร่างแหไมเซลล์ (micelles) ในเม็ดสตาร์ชของแป้งได้อย่างอิสระ โดยปกติแป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจล (gelatinization temperature) เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ๆ กัน แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิการเกิดเจล พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัว ทำให้การละลาย ความหนืด และความใสเพิ่มขึ้น คุณสมบัติของการเกิด birefringence จะหมดไป ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลาย คือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้ง และการดัดแปรแป้งทางเคมี รูปแบบในการพองตัวและการละลายของเม็ดแป้งแต่ละชนิดจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไป

ค่ากำลังการพองตัว (swelling power) และความสามารถในการละลาย (solubility) ของสตาร์ช สามารถหาได้โดยการให้ความร้อนแก่สารละลายสตาร์ชในน้ำที่มากเกินไป ทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวและบางส่วนของสตาร์ชจะละลายออกมา แล้วจึงคำนวณหาค่ากำลังการพองตัวและความสามารถในการละลาย โดยกำลังการพองตัวของสตาร์ชจะแสดงเป็นปริมาตรหรือน้ำหนักของเม็ดสตาร์ชที่เพิ่มขึ้นมากที่สุด เมื่อเม็ดสตาร์ชพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ ส่วนความสามารถในการละลายจะแสดงเป็นน้ำหนักของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่สามารถละลายได้ (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2543)

ค่ากำลังการพองตัว และความสามารถในการละลายของสตาร์ช ข้าวสาลีและสตาร์ชข้าวเจ้าแสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 กำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายของสตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชข้าวเจ้า

	สตาร์ชข้าวสาลี	สตาร์ชข้าวเจ้า
กำลังการพองตัว	21	19
ความสามารถในการละลาย (ร้อยละ)	41	18

ที่มา: ดัดแปลงจาก กล้าณรงค์ และเกื้อกุล (2543)

2.4.3.2 การเกิดเจลลิตินเซชัน (gelatinization)

โมเลกุลของสตาร์ชประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดสตาร์ชอยู่ในรูปร่างแห micelles ดังนั้นการจัดเรียงตัวในลักษณะนี้จะทำให้เม็ดสตาร์ชละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่ยังมีสตาร์ชอยู่ในน้ำเย็นเม็ดสตาร์ชจะดูดซับน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายสตาร์ช พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดสตาร์ชจะดูดน้ำแล้วพองตัว ส่วนผสมของสารละลายสตาร์ชจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆ เม็ดสตาร์ชมีน้อยลง เม็ดแป้งจะเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลลิตินเซชัน (gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลลิตินเซชัน เมื่อตรวจวัดโดยเครื่องมือวัดความหนืดมักจะเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting time) ซึ่งจะแตกต่างกันในสตาร์ชแต่ละชนิด

ความหนืดสูงสุดของสารละลายสตาร์ชในระหว่างที่เกิดเจลลิตินเซชันจะแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของสตาร์ช สำหรับสตาร์ชข้าวสาลีจะมีความหนืดสูงสุดต่ำ เนื่องจากเม็ดสตาร์ชมีกำลังการพองตัวอยู่ในระดับปานกลาง ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณอะไมโลสและไขมัน นอกจากนี้ระดับอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตินเซชันจะแตกต่างกันไปตามชนิดและองค์ประกอบของสตาร์ช เช่น ปริมาณไขมัน สัดส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน การจัดเรียงตัวและขนาดของเม็ดสตาร์ช เนื่องจากการจัดเรียงตัวของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินภายในเม็ดสตาร์ช มีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ ทำให้เม็ดสตาร์ชมีขนาดต่างกัน สตาร์ชต่างชนิดกันจะมีลักษณะการ

เกิดเจลที่แตกต่างกัน การเกิดเจลาติโนเซชันไม่ได้เกิดเฉพาะอุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง แต่เกิดเป็นช่วงอุณหภูมิที่มีความกว้างประมาณ 8-12 °C สตาร์ชแต่ละชนิดจะมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลต่างกัน (กล้านรงค์ และเกื้อกุล, 2543)

2.4.3.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation)

เมื่อสตาร์ชได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาติโนเซชัน แล้วให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลง โมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแห 3 มิติ โครงสร้างใหม่ที่สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น ทำให้เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือการคืนตัว หรือ setback เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีก ลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งเรียกว่า syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น

การคืนตัวของแป้งเปียกและสารละลายสตาร์ช ทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น มีลักษณะขุ่นและทึบแสง เกิดขึ้นส่วนที่ไม่ละลายในแป้งเปียกที่ร้อน เกิดการตกตะกอนของอนุภาคสตาร์ชที่ไม่ละลาย ทำให้เกิดเจลและโมเลกุลน้ำถูกบีบออกมานอกเจล ถ้าการคืนตัวของสตาร์ชเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จะเกิดการตกตะกอน แต่ถ้าเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขุ่น

การคืนตัวของสตาร์ชขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของสตาร์ช ความเข้มข้นของสตาร์ช กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิระยะเวลา ความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะไมโลส อะไมโลเพคติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ในสตาร์ช ในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นของสตาร์ชสูง สตาร์ชสามารถคืนตัวได้ดี ในช่วง pH 5-7 สตาร์ชสามารถคืนตัวได้เร็วที่สุด สำหรับช่วง pH ที่สูงหรือต่ำกว่านี้สตาร์ชจะคืนตัวได้ช้าลง

ปริมาณและขนาดของอะไมโลสมีความสำคัญต่อการคืนตัวของสตาร์ช สตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินสูง อัตราในการคืนตัวจะสูงสุด (การละลายต่ำที่สุด) ที่ degree of polymerization ของอะไมโลสเท่ากับ 100 ถึง 200 อัตราการคืนตัวจะลดลงเมื่อโมเลกุลของอะไมโลสสั้นหรือยาวกว่านี้ ในการทำให้อะไมโลสที่คืนตัวกลับมาละลายได้อีกครั้งหนึ่งนั้น ต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 100-160 °C

อะไมโลเพคตินจะมีผลทำให้เกิดการคืนตัวน้อยมาก ดังนั้นสตาร์ชแต่ละชนิดจะมีอัตราการคืนตัวที่แตกต่างกัน ในสตาร์ชข้าวสาลีจะมีอัตราการคืนตัวสูงกว่าสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลัง เนื่องจากมีปริมาณอะไมโลสสูง มีอะไมโลสโมเลกุลเล็ก และมีไขมันในปริมาณสูง ทำให้เกิดการจับตัวเป็นโครงสร้าง amylose-lipid complex

การตรวจสอบความสามารถในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ของสตาร์ชแต่ละชนิด สามารถทำได้โดยใช้เครื่อง Brabender หรือ Rapid Visco Analyzer (RVA) โดยอาจประมาณได้จากค่า setback ของแป้ง ซึ่งเป็นค่าผลต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุด (setback from peak) หรือความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด (setback from trough) เนื่องจากในแป้งส่วนใหญ่จะมีปริมาณอะไมโลเพคตินสูง และการเกิดการคืนตัวหรือรีโทรเกรเดชันนี้จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จึงมักสร้างปัญหาให้กับผลิตภัณฑ์อาหารในระหว่างการเก็บรักษา เช่น การเกิด staling ในขนมปัง (กล้านรงค์ และเกื้อกูล, 2543)

2.4.4 สมบัติของแป้งเปียก

สมบัติของแป้งเปียก (pasting properties) จากสตาร์ชแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของสตาร์ช ปริมาณสตาร์ช กระบวนการให้ความร้อน อุณหภูมิ pH เวลาในการให้ความร้อน การกวน และเครื่องมือที่ใช้

สมบัติที่สำคัญของแป้งเปียก ได้แก่ ความหนืด เนื้อสัมผัส ความโปร่งใสของแป้งเปียก และความคงทนต่อแรงเฉือน (shear rate) โดยปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดของแป้งเปียกคือ ชนิดของสตาร์ช ปริมาณสตาร์ช และกระบวนการให้ความร้อน แป้งเปียกของมันสำปะหลังและสตาร์ชข้าวเหนียว จะมีความหนืดสูงกว่าแป้งเปียกของข้าวสาลี ลักษณะเนื้อแป้งเปียกของสตาร์ชข้าวเหนียวจะมีลักษณะเป็นยาง มีความเหนียวคล้ายกาว ยืดหยุ่น และเกาะกันเป็นก้อน ส่วนแป้งเปียกจากสตาร์ชข้าวสาลีจะนิ่ม ร่วน และไม่เกาะกันเป็นก้อน ความใสของแป้งเปียกแต่ละชนิดจะแตกต่างกันไป สำหรับแป้งเปียกจากสตาร์ชข้าวสาลีจะขุ่นมัว และทึบแสง (กล้านรงค์ และเกื้อกูล, 2543) สมบัติต่างๆ ของแป้งเปียกจากสตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชข้าวเจ้าแสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สมบัติต่างๆ ของแป้งเปียกจากสตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชข้าวเจ้า

สมบัติของแป้งเปียก	สตาร์ชข้าวสาลี	สตาร์ชข้าวเจ้า
ความหนืด	ปานกลาง - ต่ำ	ปานกลาง - ต่ำ
เนื้อสัมผัส	ร่วน	ร่วน
ความใส	ทึบแสง	ทึบแสง
ความคงทนต่อแรงเฉือน	ปานกลาง	ปานกลาง
อัตราการคืนตัว	สูง	สูง

ที่มา: ดัดแปลงจาก กล้าณรงค์ และเกื้อกุล (2543)

2.4.5 ความหนืดของสตาร์ช

ความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของสตาร์ช เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ถ้านำสตาร์ชมาผสมกับน้ำแล้วให้ความร้อน เม็ดสตาร์ชจะเกิดการพองตัวและเปลี่ยนสภาพสารผสม ทำให้เกิดความข้นหนืดขึ้น (มงคล และคณะ, 2542)

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความหนืดของสตาร์ช ได้แก่ ชนิดของสตาร์ช การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีต่างๆ ขนาดของเม็ดสตาร์ช และปริมาณอะไมโลส กล่าวคือ เม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่ย่อมมีกำลังการพองตัวสูงและให้ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) สูง ปริมาณอะไมโลสมีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน ถ้าสตาร์ชชนิดใดมีปริมาณอะไมโลสสูงย่อมแสดงค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) สูงด้วยเช่นกัน สำหรับปัจจัยภายนอกที่มีผล ได้แก่ อุณหภูมิและแรงกล กล่าวคือ ถ้ามีการใช้ความร้อนสูงหรือมีการใช้แรงกลมาก จะทำให้เม็ดสตาร์ชแตกและความหนืดลดลง (กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2543)

วิธีการตรวจวัดความหนืดของสตาร์ชสามารถกระทำได้หลายวิธี และเครื่องมือที่ใช้ในการวัดมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีหลักการทำงานและการอ่านค่าความหนืดต่างๆ กัน (กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2543) ดังนี้

1. Capillary viscometer

สามารถใช้วัดความหนืดได้ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ เท่านั้น หลักการทำงานจะใช้เวลาที่ของเหลวไหลผ่านจุด 2 จุด เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก เมื่อหลอดแคปิลลารีตั้งตรง จากนั้นจึงเปรียบเทียบกับของเหลวที่ทราบความหนืด เช่น น้ำ ก็จะหาความหนืดของของเหลวที่ต้องการได้ ได้หน่วยของความหนืดเป็น mPa.s

2. Brookfield viscometer

สามารถวัดความหนืดได้ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ มีทั้งชนิดแบบหน้าปัด (dial reading viscometer) และแบบดิจิทัล (digital viscometer) การทำงานของเครื่องเกิดจากการหมุนของวัตถุทรงกระบอก หรือแผ่นจานในของเหลวด้วยอัตราเร็วคงที่ ค่าความหนืดของของเหลววัดได้จากค่าความต้านทานการหมุนของของเหลวที่อัตราเร็วคงที่ แรงต้านจะทำให้สปริงเกิดการยืดตัว และเกิดการหมุนบนหน้าปัดซึ่งแสดงด้วยเข็มสีแดงบนหน้าปัดเครื่อง ค่าที่อ่านได้จากหน้าปัดของเครื่องแบบหน้าปัด จะนำมาคำนวณโดยคูณด้วยค่าคงที่ตามความเร็ว ขนาด และชนิดของเครื่อง brookfield viscometer เพื่อแปลงค่าที่อ่านได้จากหน้าปัดมาเป็นค่าความหนืดปรากฏ ขณะที่เครื่องแบบดิจิทัลจะสามารถแสดงค่าความหนืดที่เกิดขึ้นได้โดยปรากฏบนหน้าจอแสดงผลการวัดค่า เครื่องชนิดนี้ได้หน่วยความหนืดของของเหลวเป็นเซนติพอยส์ (centipoise)

3. Brabender amylograph

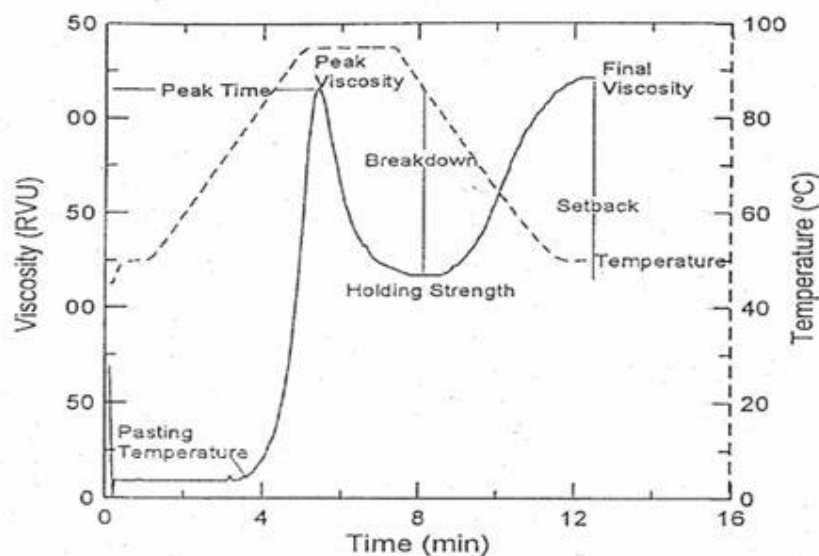
เป็นเครื่องมือที่นิยมแพร่หลาย หลักการทำงาน คือ การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชในระหว่างการทำให้ร้อนจนถึงขั้นการทำให้เย็น ติดตามผล และแสดงผลในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ได้หน่วยความหนืดเป็น Brabender Unit (BU) สามารถเปลี่ยนเป็น centipoises ได้โดยเปรียบเทียบความหนืดของสารละลายแป้งสุกร้อยละ 5 ความหนืด 500 BU เท่ากับ 2,700 centipoise ความหนืดค่าต่างๆ ที่ได้จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะที่สำคัญของสตาร์ชแต่ละชนิด

เมื่อเม็ดสตาร์ชได้รับความร้อนจะดูดซึมน้ำและพองตัวขึ้น น้ำบริเวณรอบๆ เม็ดสตาร์ชเหลือน้อยลง ทำให้เม็ดสตาร์ชเคลื่อนไหวได้ยาก เกิดความหนืดขึ้น อุณหภูมิที่กราฟเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืด (pasting temperature) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่มีความหนืดสูงสุด (peak viscosity) เป็นจุดที่เม็ดสตาร์ชมีการพองตัวเต็มที่ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาต่อไปอีก รวมทั้งมีการกวนอย่างต่อเนื่อง จะทำให้โครงสร้างภายในแตกออก ความหนืดลดลง ต่อมาลดอุณหภูมิลง ทำให้เกิดการรีโทรเกรเดชัน ความหนืดจะเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งเป็นความหนืดที่เกิดจากการเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลอะไมโลสที่หลุดออกจากเม็ดสตาร์ช

4. Rapid Visco Analyzer (RVA)

เป็นเครื่องมือสำหรับประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะต้องพิจารณาความหนืดขณะที่ให้ความร้อน คุณสมบัติพิเศษ คือ มีความสามารถในการเปลี่ยนระดับอุณหภูมิสามารถทำให้ร้อนและเย็นได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว สามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้ จึงทำให้สามารถหา pasting curve ได้ภายใน 13 นาที เนื่องจากมีกลไกการส่งผ่านความร้อนที่ดีกว่า และ

ใช้ปริมาณตัวอย่างน้อยกว่าเครื่อง Brabender ตัวอย่าง pasting curve ที่ได้จากเครื่อง RVA แสดงดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ตัวอย่าง pasting curve ที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของสตาร์ชด้วยเครื่อง RVA ที่มา: กล้าณรงค์ และเกื้อกุล (2543)

ค่าที่เครื่องแสดงผลอ่านได้บนจอคอมพิวเตอร์ในหน่วยร้อยละ หรือ RVU มีดังนี้

- peak time: เวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด มีหน่วยเป็นนาที
- pasting temperature: อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนค่าความหนืด
หรือมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น 2 RVU ในเวลา 20 วินาที มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$)
- peak temperature: อุณหภูมิที่เกิดความหนืดสูงสุด มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$)
- holding strength: ความหนืดที่ต่ำที่สุดระหว่างการทำเย็น
- breakdown: ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด
- final viscosity: ความหนืดสุดท้ายของการทดลอง
- setback from peak: ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุด
- setback from trough: ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด

สำหรับสมบัติความหนืดของสตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชข้าวเจ้า เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA แสดงดังตารางที่ 2.7

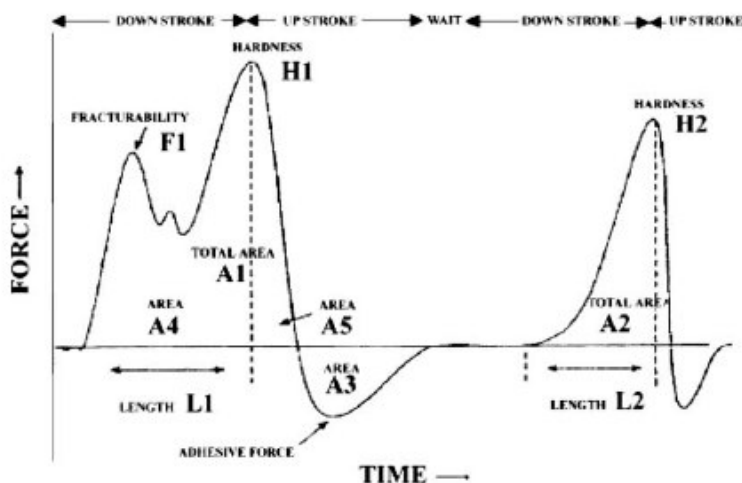
ตารางที่ 2.7 สมบัติความหนืดของสตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชข้าวเจ้าเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA

สมบัติความหนืด	สตาร์ชข้าวสาลี	สตาร์ชข้าวเจ้า
gel temperature ($^{\circ}\text{C}$)	52-65	61-78
peak viscosity	ต่ำ	ปานกลาง
breakdown	ต่ำ/ปานกลาง	ต่ำ/สูง
setback	ปานกลาง/สูง	ปานกลาง/สูง
paste clarity	ทึบแสง	ทึบแสง

ที่มา: ดัดแปลงจาก กล้าณรงค์ และเกื้อกุล (2543)

2.4.6 การวัดเนื้อสัมผัสของเจลแป้ง

ลักษณะการคั่นตัวของสตาร์ชทำให้ได้สตาร์ชที่มีเนื้อสัมผัสเปลี่ยนแปลงไป เช่น ได้เจลที่มีความแข็งแรง มีความยืดหยุ่น เป็นต้น ซึ่งลักษณะเนื้อสัมผัสนี้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ และผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะมีความต้องการลักษณะเนื้อสัมผัสที่แตกต่างกันไป ในการใช้ประโยชน์ของสตาร์ชหรือแป้ง จึงจำเป็นต้องมีการประเมินคุณลักษณะทางเนื้อสัมผัสของเจลแป้งด้วย ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ประสาทสัมผัสของมนุษย์โดยการชิม หรือการวัดด้วยเครื่องมือต่างๆ ซึ่งเครื่องมือที่นิยมใช้ในการวัดเนื้อสัมผัสของเจลแป้ง คือ เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (texture analyzer) (รุ่งนภา และคณะ, 2546) ซึ่งจะทำงานโดยเลียนแบบการเคี้ยวของมนุษย์ โดยหัววัดจะทำการกดตัวอย่าง 2 ครั้ง แล้วแสดงค่าเนื้อสัมผัสออกมาในรูปกราฟ (ภาพที่ 2.6)



ภาพที่ 2.6 ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์เค้าโครงลักษณะเนื้อสัมผัส (texture profile analysis) ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส

ที่มา: Shah และคณะ (2006)

ค่าต่างๆ ที่บันทึกได้จากกราฟการวิเคราะห์เค้าโครงลักษณะเนื้อสัมผัส ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Shah และคณะ, 2006) มีดังนี้

- Firmness/Hardness: เป็นค่าแรงกดสูงสุดของการกดผลิตภัณฑ์ครั้งแรก โดยไม่จำเป็นต้องเกิดที่จุดที่ลึกที่สุดของการกด (H1)
- Fracturability: ค่าแรงที่จุดสูงสุดในการกดครั้งแรก หลังจากเกิดการแตกหัก (F1)
- Cohesiveness: เป็นค่าที่บอกถึงการทนต่อการเสียรูปของผลิตภัณฑ์ต่อการกดครั้งที่สอง ซึ่งจะสัมพันธ์กับพฤติกรรมที่ตอบสนองหลังจากเกิดการกดครั้งแรก โดยวัดจากพื้นที่ของงานที่ได้ระหว่างการกดครั้งที่ 2 หารด้วยพื้นที่ของงานที่ได้ระหว่างการกดครั้งแรก ($A2/A1$)
- Springiness: บอกถึงค่าการคืนตัวกลับของผลิตภัณฑ์หลังจากการเสียรูปในระหว่างการกดครั้งแรกว่าคืนตัวได้ดีเพียงใด การคืนตัวกลับวัดจากการถ่วงแรงของการกดครั้งที่ 2 ในบางกรณีที่ตั้งเวลาในการกดนานเกินไป จะทำให้ค่าการคืนตัวกลับมากกว่าความเป็นจริง โดยค่าที่ได้วัดจากระยะทางที่ได้จากการกดครั้งที่ 2 หารด้วยระยะทางจากการกดครั้งแรก ($L2/L1$)

- Gumminess: เป็นค่าที่ประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ประเภทกึ่งของแข็ง (semi-solid) ซึ่งคำนวณจากค่า Hardness คูณกับ Cohesiveness ($H1 \cdot A2/A1$)
- Chewiness: เป็นค่าที่ประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ประเภทของแข็ง (solid) ซึ่งคำนวณจากค่า Gumminess คูณกับ Springiness ($H1 \cdot A2/A1 \cdot L2/L1$)

2.5 ขนมปัง

ขนมปัง (bread) เกิดจากการนำเอาแป้งสาลีที่ได้จากการบดเมล็ดข้าวสาลีมาผสมให้เข้ากับน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม เกิดเป็นสารชนิดหนึ่งเรียกว่ากลูเตน (gluten) มีลักษณะเป็นยางเหนียว ยืดหยุ่นได้ ซึ่งกลูเตนที่ได้นี้เกิดจากโปรตีน 2 ชนิด ที่อยู่ในแป้งสาลี คือ กลูเตนิน (glutenin) และไกลอะดลิน (gliadin) รวมกันอยู่ในสัดส่วนที่เหมาะสม โดยที่กลูเตนจะเป็นตัวทำหน้าที่ในการกักเก็บก๊าซไว้ เพื่อให้เกิดโครงร่างที่จำเป็นของผลิตภัณฑ์ และเกิดเป็นโครงร่างแบบฟองน้ำเมื่อได้รับความร้อนจากเตาอบ กลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า “ขนมปัง”

ขนมปังสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท (จิตธนา และอรอนงค์, 2539) ดังนี้

1. ขนมปังฝรั่งเศส ขนมปังอิตาเลียน และขนมปังเวียดนาม

ขนมปังทั้ง 3 แบบ ทำจากโดที่มีปริมาณไขมันต่ำประมาณร้อยละ 0-3 โดยของขนมปังทั้ง 3 แบบนี้ ส่วนใหญ่จะมีส่วนผสมเหมือนกัน แป้งที่ใช้ทำขนมปังชนิดนี้จะต้องเป็นแป้งที่มีปริมาณกลูเตนสูง เพื่อที่จะสามารถทนทานต่อการหมักได้นาน ทนต่อการพักตัวและการขึ้นฟูของโดในระยะแรกของการอบ

2. ขนมปังปอนด์หัวกะโหลก และขนมปังแซนด์วิช

เป็นขนมปังที่ชาวอเมริกันนิยมบริโภคกันมาก เพราะมีเนื้อขนมปังขาวและนุ่ม ทำจากโดที่มีปริมาณไขมันร้อยละ 3-6 ถ้าใช้พิมพ์ขนมปังแบบธรรมดาในการผลิต ก็จะเป็นขนมปังปอนด์หัวกะโหลก แต่ถ้าใช้พิมพ์ที่มีฝาปิดข้างบน ก็จะมีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยม ซึ่งนิยมนำมาทำเป็นแซนด์วิช จึงเรียกว่าขนมปังแซนด์วิช

3. ขนมปังเนื้อนุ่ม (soft rolls หรือ soft buns)

เป็นขนมปังที่ทำจากโดที่มีความเข้มข้นสูง ปกติจะทำจากโดที่มีน้ำตาลและไขมันมากกว่าขนมปัง 2 ชนิดแรก (ไขมันร้อยละ 6-12) ปริมาณไขมันอาจเพิ่มขึ้น หรืออาจไม่ใส่ก็ได้

แป้งที่ใช้เป็นแป้งที่มีความแข็งแรงปานกลาง คือ กลูเตนไม่แข็งแรงมาก ขนมปังที่อบได้จะมีรสหวานนุ่ม และมีเนื้อละเอียด เช่น ขนมปังแฮมเบอร์เกอร์ ขนมปังฮอตดอก

4. ขนมปังหวาน (sweet dough)

โดที่ทำขนมปังหวานจะต้องมีสูตรเข้มข้นกว่าโดที่ใช้ทำขนมปังจืด โดยมีปริมาณน้ำตาล นม ไขมัน และไข่สูงกว่าขนมปังจืด (ไขมันร้อยละ 12-24) ขนมปังหวานจากสูตรพื้นฐานเพียงสูตรเดียว สามารถดัดแปลงให้เกิดเป็นขนมปังหวานมากมายหลายชนิด โดยการปรับให้มีรูปร่างและขนาดต่างๆ กัน ใส่ไส้ชนิดต่างๆ แป้งที่ใช้อาจใช้แป้งสาลีชนิดแข็ง และแป้งสาลีอเนกประสงค์ เช่น ขนมปังไส้ต่างๆ

2.5.1 กรรมวิธีการผลิตขนมปัง

การผลิตขนมปังมีขั้นตอนต่างๆ (อรอนงค์, 2540) ดังนี้

1. การผสม

มีจุดประสงค์หลัก 2 ประการ คือ เพื่อให้ส่วนผสมทั้งหมดเข้ากันดี และเพื่อให้เกิดความยืดหยุ่นของโด สำหรับวิธีการผสมที่นิยมมี 2 แบบ คือ แบบผสมครั้งเดียว (straight dough method) และแบบผสมสองครั้ง (sponge and dough method) โดยการผสมครั้งเดียวจะผสมส่วนผสมทั้งหมดรวมกันทีเดียว จนส่วนผสมเข้ากับน้ำรวมเข้ากับส่วนผสมอื่น ได้ลักษณะโดที่ดี มีความยืดหยุ่น สำหรับการผสมสองครั้งจะแบ่งการผสมเป็นสองครั้ง คือ ครั้งแรกจะผสมแป้งส่วนใหญ่น้ำและยีสต์เพื่อให้เข้ากันเท่านั้น แล้วหมักทิ้งไว้ เรียกส่วนนี้ว่าส่วนสปันจ์ ซึ่งจะใช้เวลาหมักประมาณ 2-3 ชั่วโมง แล้วจึงทำการผสมครั้งที่สอง โดยผสมส่วนสปันจ์รวมกับแป้งส่วนที่เหลือและส่วนผสมอื่น ตีผสมให้เข้ากันจนได้โดที่เรียบเนียนเช่นเดียวกับการผสมครั้งเดียว

2. การหมักโด

มีจุดประสงค์เพื่อให้โดมีการพองตัว เนื่องจากเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้น เพราะยีสต์ในส่วนผสมเจริญเติบโต และเปลี่ยนองค์ประกอบของสารอาหารในแป้งบางส่วนข้างในเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีผลให้ก้อนโดขยายตัวขึ้นเป็นสองเท่า จึงจำเป็นต้องไล่ลมหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากโดก่อนที่จะอบโดจะใหญ่เกินไปจนแตกเอง การไล่ลมนี้อาจจะทำครั้งเดียวในช่วงหมัก หรือทำสองครั้งก็ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของขนมปัง

3. การตัดแบ่งก้อนโด

มีจุดประสงค์เพื่อให้ได้ก้อนโดที่มีขนาดเท่ากัน ตามลักษณะชนิดของขนมปัง เมื่อตัดแล้วต้องปั้นให้เป็นก้อนกลมอีกครั้ง เพื่อควบคุมก๊าซให้อยู่ภายในโดได้

4. การพักโดระยะสั้น

มีจุดประสงค์เพื่อให้โดได้พักคลายตัวหลังจากการตัดและปั้นกลม จะได้สามารถปั้นเป็นรูปร่างต่างๆ ที่ต้องการได้ง่ายขึ้น เมื่อพักได้ประมาณ 8-12 นาทีแล้ว จึงทำการปั้นก้อนโดเพื่อนำลงพิมพ์

5. การใส่พิมพ์

มีจุดประสงค์เพื่อให้ขนมมีรูปร่างและขนาดเท่ากัน และสุกอย่างสม่ำเสมอ โดยนำก้อนโดที่ปั้นเป็นรูปร่างแล้วใส่ลงในพิมพ์ที่ทำเนยขาวบางๆ เพื่อไม่ให้ขนมบังติดพิมพ์เมื่อสุก

6. การหมักโดก่อนอบ

มีจุดประสงค์เพื่อให้ขนมปังได้หมักอีก จนขนมขึ้นเกือบเต็มพิมพ์

7. การอบ

มีจุดประสงค์เพื่อให้ขนมปังสุก มีกลิ่นรสชวนรับประทาน อุณหภูมิที่ใช้อบอยู่ในช่วง 180-220 °C เวลาที่ใช้ในการอบขึ้นอยู่กับชนิดของขนมปัง

2.5.2 โดขนมปัง

โดขนมปัง (dough) เกิดจากการผสมแป้งสาลีกับน้ำ นวดผสมให้เข้ากัน ในตอนแรกก้อนแป้งจะมีลักษณะหยาบ และ เมื่อตั้งขึ้นมาจะเหนียวติดมือ เมื่อนวดต่อไปเรื่อยๆ ก้อนแป้งจะเริ่มมีความยืดหยุ่นเล็กน้อย เรียบเนียนขึ้นและแห้ง แต่ยังคงเกาะติดกับอ่างผสมและตะขอที่ใช้ในการผสมอยู่ เมื่อนวดผสมต่อไปเรื่อยๆ จนถึงระยะเวลาที่เหมาะสม จะได้ก้อนแป้งที่มีลักษณะเรียบเนียนและแห้ง ไม่เกาะติดกับอ่างผสมและตะขอที่ใช้ในการผสมอีกต่อไป เมื่อจับดูก้อนแป้งจะมีความนุ่ม มีความยืดหยุ่นที่พอเหมาะ เมื่อตั้งขึ้นมาจะไม่เหนียวติดมือ และสามารถดึงยืดให้เป็นแผ่นฟิล์มบางๆ ได้โดยไม่เกิดการฉีกขาด เรียกก้อนแป้งที่มีลักษณะดังกล่าวหลังจากการผสมแล้วว่า “โด” (dough) (จิตธนา และอรอนงค์, 2539)

ในขณะที่ทำให้การผสมโด อากาศจะถูกตีผสมเข้าไปในโด ทำให้เกิดฟองอากาศเล็กๆ ในช่วงแรกก๊าซไนโตรเจนจะเป็นก๊าซที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากไม่ละลายน้ำ จึงได้ฟองอากาศขนาดใหญ่กว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซออกซิเจนที่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อถึงจุดผสมที่เหมาะสม จะมีอากาศเพียงครั้งเดียวเท่านั้นที่ยังคงอยู่ การทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กละเอียด และมีปริมาตรมากขึ้น ทำได้โดยการไล่ลมหรือนำโดไปนวดอีกครั้งหนึ่ง ส่วนการหมักภายใต้สภาวะสุญญากาศซึ่งมีความดันต่ำ ทำให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่ขึ้น หรือการใช้สารลดแรงตึงผิวเพื่อทำให้เกิดฟองอากาศได้ง่ายขึ้น ในช่วงการผสมโด ส่วนของกลูเตนจะเป็นส่วนที่ไม่ละลายน้ำ แต่จะดูดซับน้ำไว้ ถือเป็นเฟสที่สม่ำเสมอ แต่แป้งและเซลล์อากาศจะเป็นเฟสที่ไม่สม่ำเสมอ โดยที่เซลล์ของยีสต์และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมัก ได้แก่ น้ำตาล กรดอินทรีย์

และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะกระจายอยู่ทั่วๆ ไปในเฟสส่วนที่เป็นของเหลว ถ้าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายในเฟสที่เป็นของเหลวจนอิ่มตัวแล้ว ก็จะมีอยู่ในรูปก๊าซที่สามารถแทรกเข้าไปในเซลล์อากาศที่มีอยู่แล้วจากการผสมได้ ทำให้ปริมาตรของโดเพิ่มขึ้น เรียกว่าโดที่พัฒนาเต็มที่แล้ว

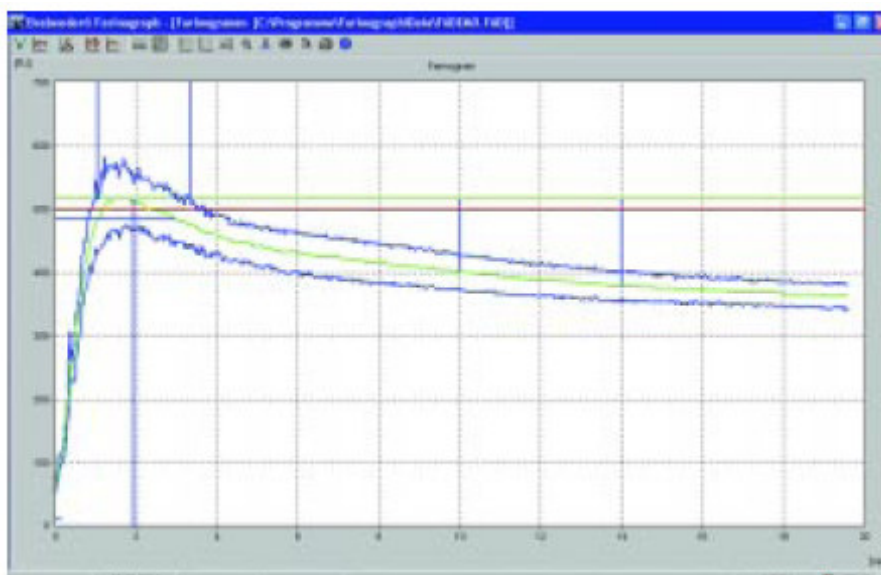
กระบวนการในการพัฒนาโดเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ คือ โดที่มีความยืดหยุ่นสูง เมื่อพักตัว (relax) จะได้โดที่มีความยืดหยุ่นต่ำ และเกิดการผันกลับได้เมื่อทำการนวด การที่โดมีคุณสมบัติเช่นนี้ แสดงว่าพันธะของโดนั้นต้องไม่ใช่พันธะโควาเลนต์ที่มีความแข็งแรง กล่าวคือพันธะที่เกิดขึ้นในโดอาจจะเป็นพันธะไฮโดรเจนหรือพันธะที่ชอบน้ำ (hydrophillic) หรือทั้งสองอย่าง สมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของโดก็คือ สมบัติในการจับอากาศเข้าไปได้ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความเหนียวของโด ในช่วงการผสมจะมีการจับอากาศจากภายนอกไว้ประมาณครึ่งหนึ่ง ส่วนมากมักเป็นก๊าซไนโตรเจน ช่วงนี้จะมีความสำคัญมาก เพราะเป็นช่วงการสร้างเซลล์อากาศ (air cell) ถ้าในช่วงผสมมีการจับอากาศได้น้อย ขนมปังที่ได้จะมีลักษณะเนื้อที่หยาบและมีเซลล์อากาศขนาดใหญ่ ในการผสมโดบางครั้งอาจทำภายใต้สภาวะสุญญากาศบางส่วน (partial vacuum) ซึ่งการผสมในสภาพแบบนี้จะมีความกดอากาศต่ำ ดังนั้นฟองอากาศจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและเป็นจำนวนมาก จึงได้ขนมปังที่มีลักษณะเนื้อละเอียดกว่าปกติ (Pylar, 1988)

เมื่อถึงช่วงการหมักโด ในระหว่างที่หมักโดทิ้งไว้นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นภายในโด โดยที่ยีสต์จะใช้น้ำตาลบางส่วนเป็นอาหาร และแป้งจะถูกเปลี่ยนเป็นน้ำตาล จนในที่สุดจะกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอลกอฮอล์ ซึ่งก๊าซนี้มีส่วนทำให้โดขยายตัว เอนไซม์โปรตีเอสที่มีอยู่ในยีสต์จะช่วยให้กลูเตนนุ่มและยืดตัวได้ นอกจากนั้นจะมีการดัดเกิดขึ้นในขณะหมักโด ซึ่งกรดที่เกิดขึ้นนี้ก็มีส่วนช่วยให้โดยืดตัวได้เช่นกัน หลังจากหมักโดไว้นานช่วงระยะเวลาหนึ่ง โดจะมีปริมาตรเพิ่มขึ้นเกือบสองเท่าตัว เมื่อถึงระยะนี้จำเป็นที่จะต้องทำให้ก้อนโดที่มีปริมาตรเพิ่มขึ้นนี้มีปริมาตรลดลง โดยใช้วิธีจิ้มลงไปบนก้อนโดที่หมักขึ้นแล้วนั้นหลายๆ ครั้ง หรืออาจนำโดที่ขึ้นนั้นไปผสมใหม่กับส่วนผสมที่เหลือตามวิธีการทำผลิตภัณฑ์แต่ละวิธี (จิตรนา และอรอนงค์, 2539)

2.5.2.1 การวิเคราะห์สมบัติของโดด้วย Farinograph

Farinograph เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความแข็งแรงของโด และค่าร้อยละของการดูดซับน้ำของโด วิธีการวัดค่าทำได้โดยการเติมน้ำในปริมาณที่เหมาะสมลงในตัวอย่างแป้ง แล้วกวนผสมด้วยใบพัดโลหะที่ความเร็วรอบสม่ำเสมอ เพื่อทำให้เกิดโดที่มีความเหนียวเพิ่มขึ้นตามที่กำหนด คือ 500 BU (Brabender Unit) จากนั้นเครื่องคอมพิวเตอร์จะทำการบันทึกค่าต่างๆ ที่

วัดได้และแสดงผลอยู่ในรูปของกราฟ farinogram โดยแกน X เป็นเวลาในการผสม และแกน Y เป็นค่า consistency หรือความหนืด มีหน่วยเป็น Farinograph Unit (FU) ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ลักษณะของ farinogram ที่วิเคราะห์ได้จาก Farinograph

ที่มา: C.W. Brabender Instrument Inc. (2007b)

ค่าที่สามารถอ่านผลได้จาก farinogram (Pyler, 1988) มีดังนี้

- arrival time: เวลาที่ทำให้ curve ขึ้นสูงถึง 500 FU โดยนับตั้งแต่เวลาเริ่มต้น โดยที่ดีควรมีค่า arrival สูง
- peak time: เวลาที่ทำให้ curve ขึ้นถึงจุดสูงสุด ค่านี้แสดงถึงความแข็งแรงของแป้งในขณะผสม ยิ่งมีค่า peak มาก แสดงว่าแป้งมีความแข็งแรงสูง
- departure หรือ development time: เวลาจากจุดเริ่มต้นของ curve ไปจนถึงจุดที่ curve เริ่มต่ำกว่าเส้น 500 FU
- tolerance หรือ stability time: ระยะเวลาที่ curve อยู่ระหว่าง arrival time กับ development time ค่า stability ที่มาก แสดงว่าแป้งมีความทนทานในขณะผสมได้ดี

- mixing tolerance index (MTI): ค่าความแตกต่างของความหนืดในหน่วย BU จากจุด peak ถึงจุด 5 นาทีหลังจากเกิด peak ค่านี้จะบอกว่าต้องใช้เวลาผสมโดนานแค่ไหน
- water absorption: ปริมาณการดูดซับน้ำของแป้งเพื่อให้เกิดเป็นโดที่มีความหนืด 500 FU

2.5.2.2 การวิเคราะห์สมบัติของโดด้วย Extensograph

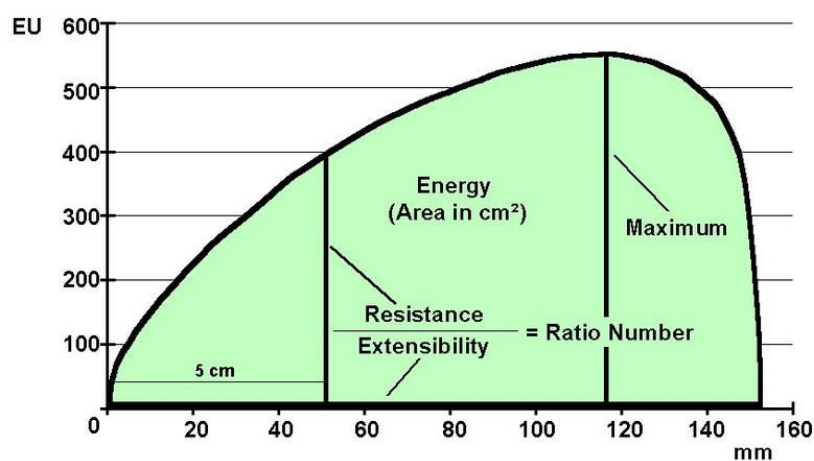
ความสามารถในการยืดขยายของโด (dough extensibility) และการต้านทานต่อการยืดขยายของโด (resistance to extension) สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง Brabender extensigraph หรือ Extensograph

ในการวิเคราะห์จะต้องเตรียมโดด้วยเครื่อง Farinograph โดยผสมน้ำลงไปในแป้งเท่ากับปริมาณการดูดซับน้ำของแป้งเพื่อให้เกิดเป็นโดที่มีความหนืด 500 BU (ค่า water absorption) ทำการนวดผสมโดด้วยความเร็วคงที่จนโดมีความหนืดสูงสุด จากนั้นนำโดไปคลึงเป็นก้อนกลมและปั้นเป็นรูปแท่งทรงกระบอกด้วยเครื่อง Extensograph แล้วนำไปหมักที่อุณหภูมิคงที่นาน 45 นาที นำชิ้นโดที่หมักได้มาวางบนแท่นจับ (balance arm) พร้อมยืดโดด้วยตัวยึด (holder) จากนั้นเมื่อเครื่องเริ่มทำงาน ตัวเกี่ยวรูปตะขอจะเลื่อนลงมาด้วยความเร็วคงที่ผ่านบริเวณกลางชิ้นโดและยืดโดออกจนขาด (ภาพที่ 2.8) จากนั้นจึงนำโดชิ้นเดิมไปผ่านขั้นตอนดังที่ได้กล่าวมาแล้ว คือ คลึงเป็นก้อนกลม ปั้นเป็นรูปแท่งทรงกระบอก หมัก แล้วนำมายืดด้วยตัวเกี่ยวรูปตะขอจนขาด ทำอย่างนี้ซ้ำอีก 2 รอบ จะได้กราฟที่แสดงผลออกเป็น 3 เส้น คือ กราฟของโดที่ผ่านการหมักเป็นระยะเวลานาน 45, 90 และ 135 นาที การแสดงผลจะอยู่ในรูปของกราฟ extensogram โดยแกน X เป็นระยะทางที่โดยืดขยายได้ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และแกน Y เป็นค่าการต้านทานต่อการยืดขยายของโด มีหน่วยเป็น Extensograph Unit (EU) ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.8 แท่นจับ (balance arm) พร้อมด้วยตัวยึดชิ้นโด (holder) และตัวเกี่ยวรูปตะขอของเครื่อง Extensograph

ที่มา: C.W. Brabender Instrument Inc. (2007a)



ภาพที่ 2.9 ลักษณะของ extensogram และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่วิเคราะห์ได้จาก Extensograph

ที่มา: C.W. Brabender Instrument Inc. (2007a)

ค่าที่สามารถอ่านผลได้จาก extensogram (Pylar, 1988) มีดังนี้

- resistance to extension: ค่าการต้านทานต่อการยืดขยายของโด เป็นค่าตามแกน Y ที่วัดได้ เมื่อโดถูกดึงยืดออกไปยาว 50 มิลลิเมตร

- extensibility: ความสามารถในการยืดขยายของโด เป็นค่าที่บอกว่าโดสามารถยืดไปได้มากน้อยเพียงใด วัดจากความยาวของเส้นกราฟตามแกน X ในหน่วยมิลลิเมตร
- strength value หรือ energy: พื้นที่ใต้กราฟทั้งหมด
- proportionality figure หรือ ratio number: เป็นค่าที่คำนวณได้จากสัดส่วนของค่า resistance ต่อค่า extensibility โดยค่า ratio number ที่สูง แสดงว่าโดมีการต้านทานต่อการยืดขยายมาก

2.5.3 การใช้แป้งข้าวทอดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์ขนมปัง

ปัจจุบันการบริโภคผลิตภัณฑ์เบเกอรี่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้การนำเข้าข้าวสาลีเพื่อแปรรูปเป็นแป้งสาลีในการทำผลิตภัณฑ์เบเกอรี่มีปริมาณสูงขึ้น ดังนั้นรัฐบาลจึงให้การสนับสนุนงานวิจัยที่สามารถใช้ประโยชน์จากแป้งข้าวเพื่อทดแทนแป้งสาลีในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร เพื่อช่วยลดการนำเข้าข้าวสาลีจากต่างประเทศ เพิ่มมูลค่าข้าวให้สูงขึ้น และได้แนวทางในการพัฒนาแป้งข้าวให้มีคุณสมบัติเหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ผู้บริโภคจะได้รับประโยชน์ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาจากข้าวได้รับการยอมรับว่ามีคุณค่าทางโภชนาการที่ดี เพราะข้าวประกอบไปด้วยโปรตีนที่ย่อยง่ายและไม่ก่อให้เกิดอาการแพ้ มีคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยง่าย และมีไขมันที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวอยู่มากกว่าร้อยละ 70 ซึ่งอุดมไปด้วยสารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) ที่พบในธรรมชาติ (อรอนงค์, 2547)

ดังนั้นจึงมีงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้แป้งข้าวในการผลิตผลิตภัณฑ์เบเกอรี่หลายชนิด โดยมีทั้งการใช้แป้งข้าวทดแทนแป้งสาลีบางส่วน และการใช้แป้งข้าวทั้งหมดแทนที่แป้งสาลีในสูตรการผลิตผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ต่างๆ เช่น ขนมปัง เค้ก คุกกี้ เป็นต้น Nishita and Bean (1979) ได้ศึกษาสมบัติทางเคมีและกายภาพของแป้งข้าวเจ้าพันธุ์ต่างๆ ที่มีผลต่อคุณภาพของขนมปังที่ใช้แป้งข้าวเจ้าในการผลิต พบว่า ข้าวเจ้าพันธุ์ที่มีอะไมโลสต่ำและมีอุณหภูมิการเกิดเจลลาตินในเซชันต่ำ คือ มีอะไมโลสน้อยกว่าร้อยละ 20 และมีอุณหภูมิการเกิดเจลลาตินในเซชันต่ำกว่า 65 °C จะให้ข้าวสุกที่เหนียวนุ่ม เมื่อนำมาผลิตขนมปังจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อสัมผัสที่ดี

Noomhorm และคณะ (1994) ศึกษาการใช้แป้งข้าวเจ้าพันธุ์ต่างๆ เพื่อทดแทนแป้งสาลีบางส่วนในการผลิตขนมปัง โดยใช้แป้งข้าวเจ้าพันธุ์ กข 21, กข 23 และเหลืองประทิว แปรรูปมาถนอมแป้งข้าวเจ้าที่ใช้ทดแทนแป้งสาลีในสูตรเป็น 4 ระดับ คือ ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 ของน้ำหนักแป้ง ผลทดลองพบว่า พันธุ์และปริมาณของแป้งข้าวเจ้าที่ทดแทนลงไป ในสูตรจะส่งผลกระทบต่อหน้าหน้า ปริมาตรจำเพาะ และความชอบโดยรวมของผู้บริโภคที่มีต่อตัวอย่างขนมปังที่ผลิตได้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างขนมปังสูตรควบคุม (แป้งสาลีล้วน) กับขนมปังที่ใช้

แป้งข้าวเจ้าทดแทนแป้งสาลีในระดับต่างๆ พบว่า ผู้บริโภคให้การยอมรับขนมปังที่ใช้แป้งข้าวเจ้าพันธุ์ กข 21 ซึ่งมีปริมาณอะไมโลสและอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันต่ำ โดยสามารถใช้ทดแทนแป้งสาลีได้ในระดับร้อยละ 15 ของน้ำหนักแป้ง ส่วนแบ่งจากข้าวพันธุ์ กข 23 และเหลืองประทิวที่มีปริมาณอะไมโลส อุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชัน และค่า setback viscosity สูง จะทำให้ได้ขนมปังที่มีปริมาตรต่ำ

เพ็ญขวัญ และวิชัย (2547) ศึกษาการใช้แป้งข้าวหอมมะลิทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์ขนมอบ ได้แก่ เค้ก ขนมปังแซนด์วิช ซาลาเปา หมั่นโถว และขนมปังหวาน พบว่าสามารถใช้แป้งข้าวหอมมะลิทดแทนแป้งสาลีได้ทั้งหมดในผลิตภัณฑ์เค้ก ส่วนผลิตภัณฑ์ขนมปังแซนด์วิช ซาลาเปา และหมั่นโถว สามารถทดแทนได้ร้อยละ 35 และขนมปังหวานสามารถทดแทนได้ร้อยละ 30 โดยที่คุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมีลักษณะใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่ใช้แป้งสาลีล้วนและผู้บริโภคยอมรับผลิตภัณฑ์เหล่านี้ สำหรับการทดสอบตลาดของผู้บริโภคจำนวน 200 คน ในกรุงเทพมหานครที่มีต่อผลิตภัณฑ์ พบว่า ผู้ทดสอบคิดเป็นร้อยละ 98, 99, 88 และ 96 ของผู้เข้าร่วมการทดสอบทั้งหมด ให้การยอมรับต่อผลิตภัณฑ์ซาลาเปา ขนมปังหวาน ขนมปังแซนด์วิช และเค้กดังกล่าว ตามลำดับ และให้คะแนนความชอบโดยรวมเฉลี่ย 6.5-7.0 คะแนน ซึ่งหมายถึงผู้บริโภคชอบผลิตภัณฑ์ดังกล่าวในระดับชอบปานกลาง

พรวิมล (2544) ทำการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังจากแป้งสาลีผสมแป้งข้าวหอมมะลิ พบว่า เมื่อปริมาณแป้งข้าวหอมมะลิที่ใช้ทดแทนในสูตรเพิ่มขึ้น ขนมปังจะมีปริมาตรจำเพาะลดลง และมีค่าความแข็งของเนื้อในเพิ่มขึ้น โดยสามารถใช้แป้งข้าวหอมมะลิได้ถึงร้อยละ 30 เพื่อแทนที่แป้งสาลี สูตรที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์ประกอบด้วยแป้งสาลีชนิดทำขนมปัง แป้งข้าวหอมมะลิ หางนมผง ยีสต์แห้งชนิดผง น้ำตาลทราย เกลือป่น ไข่ไก่ น้ำ เนยขาว และโมโนกลีเซอไรด์ร้อยละ 32.83, 14.07, 1.88, 0.59, 8.44, 0.47, 4.69, 26.73, 9.38, และ 0.94 ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าความแข็งของเนื้อในขนมปัง 6.92 นิวตัน ปริมาตรจำเพาะ 3.30 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ค่าปริมาณน้ำอิสระเท่ากับ 0.92 เนื้อในขนมปังมีสีขาว มีค่าสีในระบบ L*, a* และ b* เป็น 85.7, -1.8 และ 16.7 ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ขนมปังจากแป้งสาลีผสมแป้งข้าวหอมมะลิสามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้นาน 3 วัน ส่วนแป้งผสมสำเร็จรูปจากแป้งสาลีผสมแป้งข้าวหอมมะลิสำหรับทำขนมปัง สามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้นาน 6 เดือน

2.5.4 การใช้สารเสริมคุณภาพในผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ใช้แป้งชนิดอื่นทดแทนแป้งสาลี

การใช้แป้งจากธัญพืชชนิดอื่นๆ ทดแทนแป้งสาลีบางส่วนในการผลิตขนมปังเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก เนื่องจากแป้งเหล่านั้นมีสัดส่วนของโปรตีนโปรลามีน (ในแป้งสาลีเรียกว่า

ไกลอะดิน) และกลูเตลิน (ในแป้งสาลีเรียกว่า กลูเตนิน) ที่ไม่เหมาะสมต่อการเกิดกลูเตนหรือโดซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดโครงร่างของขนมปัง การใช้แป้งชนิดอื่นทดแทนแป้งสาลี จึงเป็นการเจือจางปริมาณกลูเตนในระบบ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงคุณสมบัติของกลูเตนให้มีคุณภาพดียิ่งขึ้น โดยการใส่สารเสริมคุณภาพลงไปเพื่อช่วยให้กลูเตนมีความยืดหยุ่น และมีความสามารถในการยึดรวม (binding power) กับสารประกอบอื่นๆ ได้ดีขึ้น ทำให้สามารถดูดซับน้ำและกักเก็บก๊าซที่เกิดจากการหมักได้ น้ำที่ถูกดูดซับไว้ในปริมาณที่เพียงพอจะระเหย และทำให้สตาarchในโดเกิดการเจลาติไนเซชันระหว่างการอบ ได้เป็นขนมปังที่มีคุณภาพดี (Bechwith และ Wall, 1969)

สารเสริมคุณภาพที่นิยมใช้ในขนมปังอาจแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ได้ ดังนี้

1. สารเอนไซม์ (enzymes)

เอนไซม์หลายชนิดเกี่ยวข้องและมีประโยชน์ในการทำขนมปัง เช่น มีการเติมเอนไซม์อะไมเลสและโปรตีเอส นอกจากนี้ยังมีการเติมเอนไซม์อื่นๆ เพื่อชะลออัตราการแห้งแข็งหรือการเก่าของขนมปัง ตัวอย่างของเอนไซม์ เช่น เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส ซึ่งจะช่วยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่สายแขนงในโมเลกุลของอะไมโลเพคติน ทำให้เป็นพอลิเมอร์สายตรงมากขึ้น หรือเอนไซม์ผสมของเซลลูเลส เฮมิเซลลูเลส และเพนโทซานเนส ที่ใช้ร่วมกันกับเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่ได้จากเชื้อรา จะช่วยให้ขนมปังที่มีความชื้นเพิ่มขึ้น (นิธิยา, 2545) เอนไซม์ที่ใช้ในการทำขนมปัง แสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 เอนไซม์ที่ใช้ในการทำขนมปัง

เอนไซม์	วัตถุประสงค์ที่ใช้ในขนมปัง
อะไมเลส	ทำให้กระบวนการหมักเกิดได้สูงสุด และป้องกันไม่ให้นขนมปังแห้งแข็งและเก่าเร็ว
โปรตีเอส	ปรับปรุงสมบัติด้าน rheology
กลูตามิลทรานส์เฟอเรส/ กลูตาไทโอนออกซิเดส	ทำให้โดมีความยืดหยุ่นดี ปรับปรุงปริมาณของก้อนขนมปัง โครงสร้างของผิววนอก และรักษาความนิ่มของขนมปังในระหว่างการเก็บรักษา
เพนโทซานเนส	ลดระยะเวลาการทำโด เพิ่มความชื้น และลดพลังงานที่ใช้ในการทำขนมปัง
ซัลฟไฮไดรลออกซิเดส	ทำให้โดมีความแข็งแรงเนื่องจากเกิดพันธะไดซัลไฟด์

ที่มา: นธิยา (2545)

2. สารออกซิไดซ์ (oxidants)

มีหน้าที่เพิ่มความคงตัวของโด คือ ทำให้แป้งสาลีมีคุณภาพในการเกิดโดดีขึ้น โดยจะเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพของขนมปัง ทำให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรง สามารถ

กักเก็บก๊าซได้ดีขึ้น ขนมปังที่ได้จะมีลักษณะเซลล์อากาศที่สม่ำเสมอ ช่วยเพิ่มปริมาตรให้ขนมปัง และช่วยในการขัดขวางการเปลี่ยนแปลงพันธะไดซัลไฟด์ ทำให้โครงสร้างของกลูเตนมีความแข็งแรงมากขึ้น สารเคมีจำพวกสารออกซิไดซ์ ได้แก่ โพแทสเซียมโบรเมต โพแทสเซียมไอโอเดต อะโซไดคาร์โบนาไมด์ และกรดแอสคอร์บิก สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาในขณะที่เกิดขึ้นโด

3. สารอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifiers)

วัตถุประสงค์ของการใช้อิมัลซิไฟเออร์ในผลิตภัณฑ์ขนมปัง เพื่อช่วยให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ดีขึ้น ปริมาตรเพิ่มขึ้น กรรมวิธีในการแปรรูปง่ายขึ้น และที่สำคัญคือช่วยชะลอการเสียในลักษณะที่แห้งแข็ง (staling) ลงได้

โดยทั่วไปในแป้งจะประกอบด้วยสตาร์ช ซึ่งมีส่วนประกอบใหญ่ๆ 2 ส่วน คือ อะไมโลสและอะไมโลเพกติน ในระหว่างการอบ สตาร์ชจะมีการเกิดเจลาติไนเซชันขึ้น ส่วนที่เป็นอะไมโลสจะเกิดเป็นโครงสร้างผลึก (crystallization) ขึ้น และกลายเป็นส่วนที่เป็นโครงสร้างขนมปังต่อไป สำหรับส่วนที่เป็นอะไมโลเพกตินนั้น ก็เกิด crystallization เช่นกัน แต่จะเกิดขึ้นช้าๆ หลังจากที่เอาขนมปังออกจากตู้อบแล้วทิ้งให้เย็น และการเกิดจะเกิดต่อไปเรื่อยๆ ซึ่งการเกิด crystallization แบบนี้ จะเป็นสาเหตุให้เกิดการเสียในลักษณะที่แห้งแข็ง (staling) ทำให้เนื้อขนมปังมีลักษณะแข็ง ร่วน กลิ่นรสเปลี่ยนไป เปลือกขนมปังไม่กรอบและเหนียว การเติมอิมัลซิไฟเออร์ลงไปประมาณร้อยละ 0.25-0.5 ต่อน้ำหนักแป้ง จะช่วยชะลอการเกิด staling ได้

อิมัลซิไฟเออร์ที่นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมปัง ได้แก่ โมโนและไดกลีเซอไรต์ โมโนกลีเซอไรต์ที่มีจำหน่ายทั่วไปจะประกอบด้วย แอลฟา-โมโนกลีเซอไรต์ เบตา-โมโนกลีเซอไรต์ ไดและไตรเอสเทอร์ของกรดไขมันผสม ซึ่งแต่ละส่วนประกอบจะมีส่วนช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์แตกต่างกันไป เช่น ส่วนที่เป็นแอลฟา-โมโนกลีเซอไรต์ และเบตา-โมโนกลีเซอไรต์ จะให้ผลใกล้เคียงกัน และดีกว่าไดและไตรเอสเทอร์ ฉะนั้นในการผลิตขนมปัง อิมัลซิไฟเออร์ที่มีความสำคัญมากที่สุด คือ พวกลีเซอไรต์ (คิวพร, 2535)

4. สารไฮโดรคอลลอยด์ (hydrocolloids)

มีคุณสมบัติในการกักเก็บน้ำไว้ ป้องกันการเป็นก้อนในระหว่างการนวดโด และช่วยปรับปรุงคุณภาพโดให้เป็นเนื้อเดียวกัน ช่วยลดการสูญเสียไอน้ำในระหว่างการอบและระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์สุดท้าย เป็นตัวเพิ่มปริมาตรของผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ ทำให้เกิดการกระจายตัวของเซลล์อากาศให้มีขนาดสม่ำเสมอมากขึ้น (Kulp และคณะ, 1974) ตัวอย่างสารพวกไฮโดรคอลลอยด์ที่มีการใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมปัง ได้แก่ hydroxypropyl methylcellulose (HPMC), carboxymethylcellulose (CMC), xanthan gum และ guar gum

เนื้อทอง และคณะ (2544) พัฒนาขนมปังเสริมแป้งข้าว โดยการใช้แป้งข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสแตกต่างกัน 3 ชนิด คือ แป้งข้าวขาวดอกมะลิ แป้งข้าวที่จำหน่ายตามท้องตลาด และแป้งข้าวเหลือง 11 โดยทดแทนแป้งสาลีที่ระดับร้อยละ 10-90 และเสริมสารยัดเกาะ 3 ชนิด คือ กลูเตนผง (spray dried gluten) สารปรับปรุงคุณภาพกลูเตน (gluten improver) และ CMC แล้วตรวจสอบคุณภาพทางเนื้อสัมผัส และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมปังที่ได้ พบว่า ปริมาณน้ำมีความสำคัญต่อคุณภาพของขนมปังเสริมแป้งข้าว โดยปริมาณน้ำที่เหมาะสม คือ ระหว่างร้อยละ 65-80 ของน้ำหนักแป้ง สำหรับเวลาที่ใช้ในการนวดผสมโดแป้งข้าวจะนานกว่า แป้งสาลี และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับการทดแทนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณกลูเตนและคุณภาพของกลูเตนที่ลดลง ชนิดของแป้งข้าวที่เหมาะสม คือ แป้งข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสค่อนข้างสูง ได้แก่ แป้งพันธุ์เหลือง 11 และแป้งข้าวที่ขายตามท้องตลาด สำหรับสารยัดเกาะที่เหมาะสม คือ กลูเตนผงผสมกับสารปรับปรุงคุณภาพกลูเตน หรือกลูเตนผงผสมกับ CMC ทำให้ลักษณะขนมปังที่ได้มีปริมาตร และได้รับคะแนนการยอมรับในด้านสีของเปลือก, สีของเนื้อในขนมปัง, รูปร่างสมมาตร และความสม่ำเสมอในการอบใกล้เคียงกัน แต่จะพบลักษณะแตกและยุ่ยเป็นชิ้น และมีคะแนนการยอมรับด้านเซลล์ขนมปัง เนื้อสัมผัส กลิ่น และรสชาติลดลงตามปริมาณการทดแทนที่สูงขึ้น

ภานุมาศ (2541) ศึกษาการใช้แป้งข้าวเจ้าโมเปียกที่มีอะไมโลสร้อยละ 24.6 ร่วมกับแป้งข้าวเจ้าพรีเจลาติไนซ์เพื่อผลิตขนมปัง และทำการเสริมโปรตีนโดยใช้โปรตีนถั่วเหลืองสกัด ร่วมกับโปรตีนข้าวเจ้า พบว่า สามารถใช้แป้งข้าวเจ้าพรีเจลาติไนซ์ทดแทนแป้งข้าวเจ้าในสูตรได้ร้อยละ 20 ใช้น้ำร้อยละ 100 ของน้ำหนักแป้ง และเติมสาร hydroxypropyl methylcellulose ร้อยละ 2 ขนมปังที่ได้มีปริมาตรจำเพาะ 3.25 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม มีเนื้อในนุ่มเหนียว แน่น เล็กน้อย มีกลิ่นสาบ ผิวนุ่มไม่แตก และเมื่อเก็บไว้มากกว่า 1 วัน เนื้อในและเปลือกจะแห้งร่วน เมื่อเสริมโปรตีนในขนมปังที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้า พบว่า การใช้โปรตีนถั่วเหลืองสกัดร้อยละ 5 ร่วมกับโปรตีนข้าวเจ้าร้อยละ 10 แทนที่แป้งข้าวเจ้าผสม เป็นระดับที่เหมาะสม โดยใช้น้ำร้อยละ 110 ของน้ำหนักแป้ง ขนมปังที่ได้มีเนื้อเหนียวนุ่ม เปลือกแห้งร่วน ไม่มีกลิ่นสาบ ได้ก่อนขนมปังที่สมบูรณ์ ไม่มีรอยแตก

2.6 การทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค

การทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค คือ การวัดความรู้สึกของกลุ่มผู้บริโภคที่มีต่อลักษณะทางประสาทสัมผัสและคุณลักษณะอื่นๆ ของผลิตภัณฑ์ ในแง่ของความชอบ หรือการ

ยอมรับ โดยใช้สเกลที่กำหนดค่าอย่างชัดเจน ซึ่งผู้บริโภคคือกลุ่มตัวแทนผู้บริโภคเป้าหมายของผลิตภัณฑ์ที่ทดสอบ การยอมรับของผู้บริโภคในผลิตภัณฑ์หนึ่งๆ ไม่ได้รับรองว่าผลิตภัณฑ์นั้นจะประสบความสำเร็จทางการตลาดอย่างแน่นอน เพราะยังมีปัจจัยอื่น เช่น รูปแบบบรรจุภัณฑ์ ราคา และการโฆษณา ที่มีอิทธิพลต่อการประสบความสำเร็จทางการตลาด หากเป็นเพียงการชี้ให้เห็นถึงการยอมรับผลิตภัณฑ์โดยที่ไม่มีปัจจัยอื่นมาเกี่ยวข้อง (Resurreccion, 1998)

ผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมายต้องเป็นกลุ่มผู้ใช้/บริโภคหรือคาดว่าจะใช้/บริโภคผลิตภัณฑ์ที่ทดสอบ ซึ่งผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมายอาจได้มาจากการทำการสำรวจผู้บริโภค การคัดเลือกผู้บริโภคที่จะมาทำการทดสอบผลิตภัณฑ์ต้องพิจารณาถึงลักษณะทางประชากรศาสตร์ด้วย เพื่อให้มีความเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ทดสอบ หากทำการทดสอบในบางสถานที่ เช่น ตลาด ศูนย์การค้า หรืองานแสดงสินค้า ซึ่งไม่สามารถเลือกผู้ทดสอบล่วงหน้าได้ ก็จำเป็นต้องใช้วิธีการชักชวนบุคคลที่มีอยู่ โดยมีคำถามในการคัดเลือกเกี่ยวกับประชากรศาสตร์หรือการใช้ผลิตภัณฑ์ก่อน แล้วสอบถามความสนใจ และการมีเวลาในการทำแบบทดสอบ การกระทำดังนี้จำเป็นต้องมีผู้ช่วยหลายคน

แบบสอบถามสำหรับการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค จะต้องประกอบด้วยคำถามที่เกี่ยวข้องกับลักษณะทางประชากรศาสตร์ของผู้บริโภค เช่น เพศ อายุ รายได้ เป็นต้น คำถามเกี่ยวกับความรู้สึกที่มีต่อผลิตภัณฑ์ควรเป็นคำถามที่สั้น และเข้าใจง่าย (ASTM, 1986) สำหรับสเกลที่นิยมใช้ในแบบสอบถามการยอมรับของผู้บริโภค คือ สเกลความชอบแบบ 9 คะแนน (9-point hedonic scale) ผู้ทดสอบทำการประเมินความชอบที่มีต่อตัวอย่างโดยให้คะแนนตามระดับของสเกลความชอบ 9 คะแนน โดยอาจใช้รูปการแสดงออกทางสีหน้าแทนระดับของสเกลความชอบได้ การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้เพื่อประเมินว่าผู้ทดสอบชอบผลิตภัณฑ์ใดมากที่สุดน้อยแค่ไหน จะใช้การหาค่าเฉลี่ยของคะแนนความชอบ โดยคะแนนความชอบเท่ากับ 9 คือ ชอบมากที่สุด ไม่มาจนถึงคะแนนความชอบเท่ากับ 1 คือ ไม่ชอบมากที่สุด หากมีผลิตภัณฑ์ที่ทดสอบตั้งแต่ 2 ตัวอย่างขึ้นไป ก็สามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างต่อไปได้

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการยอมรับ ควรเป็นตัวแทนของผลิตภัณฑ์ที่ตั้งใจจะทดสอบ หากตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ ควรศึกษาวิธีการเตรียมตัวอย่างเพื่อให้ได้ตัวอย่างที่น่าเสนอแก่ผู้ทดสอบมีความสม่ำเสมอ เช่น ตัดแต่งให้มีขนาดเท่ากัน หรือผสมใหม่ หรือทำการบรรจุใหม่ สิ่งที่ต้องคำนึงในการเตรียมตัวอย่างเพื่อการทดสอบผู้บริโภค ได้แก่ ปริมาณ/ขนาดตัวอย่างต้องสม่ำเสมอทุกตัวอย่าง กรรมวิธีการเตรียมตัวอย่างและระยะเวลาที่รอก่อนเสิร์ฟตัวอย่างให้ผู้ทดสอบต้องเหมือนกัน และควรมีระบบป้องกันไม่ให้อากาศในบริเวณเตรียมตัวอย่างเข้าสู่บริเวณที่ทดสอบ นอกจากนี้ควรมีความระมัดระวังในการเสนอตัวอย่างเพื่อลดความแปรปรวน สิ่งที่ต้องควบคุมในการเสนอตัวอย่าง ได้แก่ ภาชนะที่ใช้ อาจเป็นแก้ว ถ้วยเคลือบ หรือพลาสติกก็ได้ ขึ้นอยู่

กับชนิดอาหาร ควรใช้ชนิดที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งเพื่อความสะดวกและประหยัดเวลาในการทำ ความสะอาด คุณสมบัติของตัวอย่างควรใกล้เคียงกับสภาวะการบริโภคปกติ จำนวนตัวอย่างที่เสิร์ฟให้ผู้ ทดสอบต้องเท่ากันทุกคน โดยทั่วไปไม่ควรเกิน 4 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างควรมีรหัสเป็นเลขสุ่ม สามหลัก หากมีมากกว่า 1 ตัวอย่าง และควรสุ่มเสนอตัวอย่างด้วยลำดับการนำเสนอที่สมดุล (คณาจารย์ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์, 2549)

สถานที่ในการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค จะต้องมีการควบคุมสภาวะที่ เหมาะสม การทดสอบในสถานที่ที่ต่างกันจะให้ผลการทดสอบที่แตกต่างกัน แม้จะเป็นตัวอย่าง ชนิดเดียวกัน เพราะระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ วิธีการเตรียมตัวอย่างที่ต้องควบคุมสภาวะ รวมทั้งการรับรู้ในสภาวะควบคุมแตกต่างกัน เนื่องจากมีปัจจัยอื่นๆ เข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น สิ่งรบกวนจากภายนอกไม่ว่าจะเป็นเสียง ผู้คนรอบข้าง หรือแม้กระทั่งกลิ่นต่างๆ นอกเหนือ จากอาหารที่ทดสอบและความซับซ้อนของแบบสอบถาม สถานที่ทดสอบสามารถแบ่งออกได้ (เพ็ญขวัญ, 2536) ดังนี้

1. การทดสอบผู้บริโภคภายในห้องปฏิบัติการ (laboratory test, LT)

เป็นการประเมินผลในห้องปฏิบัติการการทดสอบทางประสาทสัมผัส ซึ่งจะมี การควบคุมการเตรียมและเสนอตัวอย่างอย่างระมัดระวัง ง่ายต่อการปกปิดสีหรือสิ่งมีตำหนิ ใช้ เวลาร่น้อย แต่เป็นการทดสอบที่ไม่เป็นไปตามการบริโภคปกติ จึงอาจทำให้ได้ผลการทดสอบที่มี ความคลาดเคลื่อน

2. การทดสอบผู้บริโภคตามแหล่งชุมชน (central location test, CLT)

เป็นการทดสอบในสถานที่ที่มีผู้บริโภคอยู่รวมกันเป็นจำนวนมาก เช่น งาน แสดงสินค้า ศูนย์การค้า โรงเรียน มหาวิทยาลัย การประชุมทางวิชาการ เป็นต้น หรืออาจมีการ เลือกผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมายให้มาทดสอบโดยมีการนัดทางโทรศัพท์ไว้ล่วงหน้า โดยให้ผู้ทดสอบ ทดสอบตัวอย่างซึ่งได้เตรียมไว้ล่วงหน้า วิธีการนี้เป็นวิธีที่ประหยัดเวลา เสียค่าใช้จ่ายน้อย แต่ ผู้ทดสอบอาจได้รับการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมมาก ดังนั้นคำถามในแบบสอบถามควรชัดเจน

3. การทดสอบผู้บริโภคตามบ้าน (home use test, HUT)

วิธีนี้ให้ผู้บริโภคได้ทดสอบตัวอย่างที่บ้าน หรือในลักษณะที่ใช้หรือบริโภค อยู่เป็นประจำ โดยแจกตัวอย่างผลิตภัณฑ์ให้ผู้บริโภคพร้อมกับแบบสอบถามทางไปรษณีย์ หรือส่ง ตามบ้านที่ถูกคัดเลือก ซึ่งจะให้ผู้บริโภคสามารถพิจารณาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ระหว่างการ ใช้จริง และผู้บริโภคมีเวลาในการทดสอบที่นานขึ้น หลังจากผู้บริโภคทดสอบผลิตภัณฑ์แล้วจะส่ง แบบสอบถามกลับคืนมา ควรมีรางวัลตอบแทนแก่ผู้ทดสอบ เพื่อเพิ่มแรงจูงใจในการตอบกลับ

วิธีการนี้มีข้อเสีย คือ ค่าใช้จ่ายสูง ใช้เวลานาน ทำได้กับผลิตภัณฑ์น้อยชนิด อาจได้รับผลตอบรับไม่สูงมากนัก และอาจมีความคิดของสมาชิกในครอบครัวนอกไปจากตัวผู้ทดสอบเข้ามาเกี่ยวข้อง

จำนวนผู้ทดสอบในการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับวิธีการในการทดสอบ Stone และ Sidel (1993) แนะนำให้ใช้ผู้ทดสอบอย่างน้อย 40 คน ตัวอย่าง สำหรับการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคภายในห้องปฏิบัติการ (laboratory test, LT) หากเป็นการทดสอบผู้บริโภคตามแหล่งชุมชน (central location test, CLT) ควรมีผู้ทดสอบอย่างน้อย 100 คน แต่อาจมีจำนวน 50 ถึง 300 คน ได้ (Meilgaard และคณะ, 1991) ส่วนการทดสอบผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการทดสอบผู้บริโภคตามบ้าน (home use test, HUT) ควรใช้ผู้ทดสอบ 50-100 คน โดยปกติการใช้จำนวนผู้ทดสอบที่มากจะให้ผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือกว่าจำนวนผู้ทดสอบที่น้อย แต่ต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่าย รวมทั้งเวลาในการทดสอบที่อาจเพิ่มขึ้น (ASTM, 1986)

2.7 การทดสอบทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนา

การทดสอบทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนา (Descriptive test) เป็นวิธีการที่วัดและอธิบายลักษณะทางประสาทสัมผัสออกมาในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยผู้ทดสอบจะต้องผ่านการฝึกฝนมาอย่างเพียงพอ คุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้านต่างๆ ที่ผู้ทดสอบสามารถอธิบายได้ ได้แก่ ลักษณะปรากฏ กลิ่น กลิ่นรส เนื้อสัมผัส และคุณสมบัติทางเสียงของผลิตภัณฑ์ นอกจากนั้นผู้ทดสอบต้องได้รับการฝึกให้บอกคุณลักษณะดังกล่าวในเชิงปริมาณ โดยการใช้สเกลต่างๆ รวมทั้งฝึกการใช้ตัวอย่างอ้างอิง (reference) เพื่อสื่อให้เห็นถึงลักษณะทางประสาทสัมผัสให้เป็นที่เข้าใจตรงกัน สามารถอธิบายลักษณะทางประสาทสัมผัสของตัวอย่างได้ และสามารถประเมินระดับความเข้ม (intensity) ของลักษณะทางประสาทสัมผัสต่างๆ ในตัวอย่างที่ทดสอบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ (Resurreccion, 1998)

การทดสอบทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนา จะสามารถช่วยในการแยกลักษณะทางประสาทสัมผัสที่มีความสำคัญในผลิตภัณฑ์ และยังให้ข้อมูลเกี่ยวกับระดับความเข้มของลักษณะทางประสาทสัมผัสว่ามีอยู่มากน้อยเพียงใดในตัวอย่างที่นำมาประเมิน การทดสอบแบบเชิงพรรณนาคือเป็นการทดสอบเชิงวิเคราะห์ จึงนำมาใช้ในงานที่ต้องการศึกษาหาส่วนผสมหรือตัวแปรของกรรมวิธีการผลิต เช่น อุณหภูมิ เวลา ว่ามีผลอย่างไรกับคุณลักษณะเฉพาะสำหรับผลิตภัณฑ์ ศึกษาหาข้อมูลของส่วนผสมและกรรมวิธีการผลิตในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ปรับปรุงผลิตภัณฑ์หรือกรรมวิธีการผลิต การตรวจติดตามการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางประสาทสัมผัส

ต่างๆ ในระหว่างการเก็บรักษา รวมทั้งการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างการประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการทดสอบทางประสาทสัมผัสกับการวัดค่าทางกายภาพหรือเคมี

วิธีการทดสอบทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนา จะให้ข้อมูลรายละเอียดที่เกี่ยวกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบ ประกอบด้วย

1. การอธิบายการรับรู้ลักษณะทางประสาทสัมผัสของตัวอย่าง ได้แก่

- ลักษณะที่มองเห็น (appearance): เช่น สี ขนาด รูปร่าง เป็นต้น
- กลิ่นเฉพาะ (aroma): เป็นความรู้สึกที่รับรู้ได้ทางจมูก
- กลิ่นรส (flavor): เป็นความรู้สึกภายในปากทางด้านกลิ่น รสชาติ และความรู้สึกอื่นๆ ที่เกิดขึ้น เช่น ร้อน เผ็ด เย็น
- เนื้อสัมผัส (texture): เป็นความรู้สึกทางด้านแรงที่ใช้ในการบดเคี้ยว ตัวอย่าง และลักษณะทางด้านรูปร่าง รูปทรงของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสัมผัสด้วยมือ หรือภายในเยื่อช่องปาก เหงือก ลิ้น เพดานปาก รวมถึงความรู้สึกอื่นๆ เช่น ความรู้สึกที่เกิดขึ้นภายหลังการกลืน ตัวอย่าง (Aftertaste)

2. ระดับความเข้มของลักษณะทางประสาทสัมผัสของตัวอย่าง (Intensity)

อธิบายว่ามีอยู่ในปริมาณมากหรือน้อย โดยใช้สเกลในการวัดค่าที่กำหนดขึ้นตามมาตรฐานของการทดสอบในแต่ละการทดสอบ เช่นแบบ category scale, line scale หรือ magnitude estimation scale เป็นต้น

3. ลำดับการรับรู้ (order of perception)

เป็นลำดับก่อนหลังของความรู้สึกที่รับรู้ได้ ในลักษณะทางประสาทสัมผัสของตัวอย่างทั้งก่อนชิม ขณะชิม และหลังชิมตัวอย่าง ซึ่งเป็นความรู้สึกของลักษณะที่หลงเหลืออยู่หลังจากชิมตัวอย่างแล้ว เช่น ความรู้สึกแห้ง ขมติดคอ เป็นต้น

4. ความรู้สึกโดยรวม (overall impression)

เป็นความรู้สึกโดยรวมของกลุ่มลักษณะทางประสาทสัมผัส เช่น ความเข้มของกลิ่นโดยรวม ความเข้มของกลิ่นรสโดยรวม ความเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นต้น

ในการทดสอบทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนา ซึ่งเป็นการทำงานในเชิงวิเคราะห์จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องให้กลุ่มผู้ทดสอบที่ได้รับการคัดเลือกและฝึกฝนมาแล้วเป็นอย่างดี เป็นผู้ทำการประเมินตัวอย่าง โดยกลุ่มผู้ทดสอบจะมีการบันทึกความรู้สึกเกี่ยวกับลักษณะต่างๆ ทางประสาทสัมผัสที่มีอยู่ในตัวอย่าง มีการกำหนดคำศัพท์และคำจำกัดความที่ใช้ในการอธิบายลักษณะทางประสาทสัมผัสร่วมกัน และกำหนดแนวทางในการให้ระดับความเข้มของความรู้สึกซึ่ง

อาจเป็นสัญลักษณ์ ตัวหนังสือหรือตัวเลข เป็นต้น สำหรับวิธีการทดสอบเชิงพรรณนามีอยู่หลายวิธี ได้แก่ วิธีการทดสอบหาเค้าโครงลักษณะเฉพาะทางกลิ่นรส (flavor profile method) วิธีการทดสอบหาเค้าโครงลักษณะเฉพาะทางเนื้อสัมผัส (texture profile method) วิธีวิเคราะห์แบบพรรณนาเชิงปริมาณ (quantitative descriptive analysis, QDA) วิธีวิเคราะห์สเปกตรัมลักษณะทางประสาทสัมผัส (sensory spectrum analysis) และวิธีการหาเค้าโครงลักษณะเฉพาะทางประสาทสัมผัสแบบเลือกอิสระ (free choice profiling method) (คณาจารย์ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์, 2549)

2.8 เทคนิคทางสถิติขั้นสูงที่ใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์

เทคนิคทางสถิติด้วยการวิเคราะห์หลายตัวแปร (multivariate analysis) ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยคุณภาพของขนมปังที่ใช้แป้งข้าวสาลีทดแทนแป้งสาลีบางส่วน ได้แก่ การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (principal component analysis, PCA) การวิเคราะห์การจัดกลุ่มข้อมูล (cluster analysis) และการวิเคราะห์แผนผังความชอบของผู้บริโภค (preference mapping) ซึ่งวิธีการทางสถิติดังกล่าวมีรายละเอียดดังนี้

2.8.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (principal component analysis, PCA)

เป็นวิธีการทางสถิติที่สกัดเอาโครงสร้างสิ่งที่เหมือนกัน ออกมาจากเมตริกซ์ของความแปรปรวน (variance matrix) เมตริกซ์ของความแปรปรวนร่วม (covariance matrix) หรือเมตริกซ์ของความสัมพันธ์ (correlation matrix) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะแสดงผลของความสัมพันธ์ของข้อมูล สร้างความสัมพันธ์เชิงเส้นของข้อมูลเดิม โดยอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้สูงสุดและให้มีการสูญเสียข้อมูลน้อยที่สุด (คณาจารย์ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์, 2549) การวิเคราะห์ PCA เป็นเทคนิคที่ใช้ในการจัดตัวแปรที่มีจำนวนมากๆ มาไว้เป็นกลุ่มของตัวแปรองค์ประกอบหลัก (principal component, PC) ที่ลดจำนวนตัวแปรให้น้อยลงโดยพิจารณารายละเอียดทั้งหมดจากแต่ละตัวแปร เทคนิคนี้ไม่จำเป็นต้องทราบจำนวนกลุ่มย่อยมาก่อนว่าควรแบ่งเป็นกี่กลุ่ม และไม่ต้องทราบว่าตัวแปรใดอยู่กลุ่มไหนมาก่อน โดยจะรวมตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันไว้ในกลุ่มหรือ PC เดียวกัน ซึ่งจะเป็นส่วนประกอบเชิงเส้นตรงของตัวแปรเดิม (linear combination) โดยตัวแปรที่อยู่ใน PC เดียวกัน จะมีค่าสหสัมพันธ์ (correlation) สูง โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวอาจมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้ และแต่ละ PC จะไม่มีความสัมพันธ์กัน จึงเป็นการแก้ปัญหาตัวแปรที่มีความแปรปรวนร่วม (multicollinearity) ทำให้สามารถนำไปวิเคราะห์ทางสถิติต่อไปได้ เช่น การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (correlation analysis) การวิเคราะห์ความ

แปรปรวน (ANOVA) และการวิเคราะห์การจัดกลุ่มข้อมูล (cluster analysis) เป็นต้น พร้อมทั้งช่วยให้สามารถอธิบายความหมายของแต่ละ PC ได้ ตามความหมายของตัวแปรต่างๆ ที่อยู่ในแต่ละ PC นั้น (กัลยา, 2548) โดยองค์ประกอบแรก (PC 1) จะเป็นองค์ประกอบที่สามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรได้มากที่สุด และองค์ประกอบที่สอง (PC 2) จะอธิบายความแปรปรวนที่เหลือได้มากเป็นอันดับสอง และจะเป็นในทำนองเดียวกันกับองค์ประกอบในลำดับถัดไป

การวิเคราะห์ PCA นิยมนำไปใช้ในการสร้างแผนผังความชอบของผู้บริโภคในงานพัฒนาผลิตภัณฑ์ เพื่อหาปัจจัยคุณภาพที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อความชอบ และใช้เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของข้อมูลจากการวัดด้วยเครื่องมือ (instrumental measurement) กับข้อมูลจากการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส (คณาจารย์ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์, 2549)

2.8.2 การวิเคราะห์การจัดกลุ่มข้อมูล (cluster analysis)

เป็นเทคนิคการจัดข้อมูลที่มีความคล้ายหรือเหมือนกันให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน วิธีนี้ ไม่จำเป็นต้องทราบจำนวนกลุ่มมาก่อนว่าควรจัดเป็นกี่กลุ่ม และไม่ต้องทราบว่าตัวอย่างไหนอยู่กลุ่มใดมาก่อน เทคนิคนี้จะทำการจัดกลุ่มตัวอย่างโดยศึกษาจากตัวแปรที่นำมาใช้ในการแบ่งกลุ่ม โดยให้ตัวอย่างที่อยู่ในกลุ่มเดียวกันมีความสัมพันธ์/คล้ายกันมากกว่าตัวอย่างที่อยู่ต่างกลุ่มกัน ตัวอย่างที่อยู่ต่างกลุ่มกันจะมีความสัมพันธ์กันน้อยหรือไม่มีความสัมพันธ์กันเลย และตัวอย่างแต่ละตัวจะต้องอยู่ในกลุ่มใดกลุ่มหนึ่งเพียงกลุ่มเดียว (กัลยา, 2548) การจัดกลุ่มสามารถทำได้ด้วยวิธี Hierarchical cluster analysis (HCA) ซึ่งเป็นการจัดกลุ่มข้อมูลโดยใช้ค่าเฉลี่ยของระยะทางความคล้ายระหว่างตัวอย่าง/กลุ่มตัวอย่าง กับตัวอย่าง/กลุ่มตัวอย่างอื่นๆ ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ สามารถนำมาใช้ร่วมกันกับการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (principal component analysis) เพื่อให้ง่ายต่อการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและตัวอย่างได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น (Munoz และคณะ, 1996) เทคนิคนี้นิยมนำไปใช้ในงานทางด้านการตลาดและด้านสังคมศาสตร์ โดยเฉพาะการสำรวจกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมาย เช่น การแบ่งกลุ่มของผู้บริโภคเป้าหมาย เป็นต้น (คณาจารย์ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์, 2549)

2.8.3 การวิเคราะห์แผนผังความชอบของผู้บริโภค (preference mapping)

เป็นเทคนิคที่ใช้แผนภาพ เพื่ออธิบายหรือแสดงทัศนคติ/การรับรู้ของผู้บริโภคหรือของผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนที่มีต่อตัวอย่างหรือผลิตภัณฑ์ วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้ในงานทางด้านการตลาด มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า แผนผังตำแหน่ง โดยข้อมูลที่นำมาใช้มักจะได้จากการทดสอบการรับรู้ของผู้บริโภค (เช่น การทดสอบการยอมรับ) ผู้เชี่ยวชาญ (เช่น ข้อมูลจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนา) หรือได้จากการวัดค่าตัวอย่าง/ผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องมือ (เช่น ข้อมูลจากการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพ) โดยข้อมูลที่ได้ เช่น คะแนนความชอบ

ของผู้บริโภคแต่ละคนหรือค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวแทน จะถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบหลายตัวแปร ผลลัพธ์ที่ได้จะนำไปสร้างเป็นแผนภาพ หรือ แผนภูมิ (mapping) ซึ่งแผนภาพที่สร้างขึ้นสามารถที่จะช่วยอธิบายทัศนคติของผู้บริโภคในด้านต่างๆ เช่น ความชอบ การยอมรับ ได้ง่ายขึ้น และครอบคลุมถึงการอธิบายตัวแปรที่แฝงอยู่ได้ รวมทั้งอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ (คณาจารย์ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์, 2549)

2.9 การศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์

คุณภาพของอาหารมักจะลดลงเมื่อเวลาการเก็บรักษานานขึ้น เนื่องจากเกิดการเสื่อมเสียขึ้นตามธรรมชาติ ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี หรือจุลินทรีย์ รวมทั้งสถานะที่เก็บหรือขนส่ง ล้วนมีผลทำให้อาหารมีคุณภาพที่ลดลงจนถึงระดับหนึ่งที่ผลิตภัณฑ์ไม่ปลอดภัยต่อการบริโภคหรือไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค และไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของกฎหมาย ดังนั้นอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ อาจนิยามได้ว่า “เป็นช่วงเวลาตั้งแต่ผลิตภัณฑ์นั้นได้ผลิตขึ้นมา จนถึงเวลาที่ผลิตภัณฑ์ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคหรือไม่ปลอดภัยต่อการบริโภค โดยระหว่างช่วงเวลาดังกล่าว ผลิตภัณฑ์ยังคงมีคุณภาพทางด้านคุณค่าทางอาหาร รสชาติ ลักษณะเนื้อสัมผัส และลักษณะปรากฏเป็นที่พอใจของผู้บริโภค” (คณาจารย์ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์, 2549)

วิธีการศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ อาจแบ่งได้ดังนี้

1. การทดลองเก็บจริง

เป็นการเก็บผลิตภัณฑ์ไว้ในสถานที่วางขายในท้องตลาด ตั้งแต่ทำการผลิตออกมา และมีการตรวจสอบตลอดเวลาหรือเป็นระยะ ซึ่งอาจเป็นอาทิตย์ละครั้งหรือเดือนละครั้ง จนกระทั่งผู้บริโภคไม่ยอมรับแสดงว่าหมดอายุการเก็บรักษา วิธีนี้ได้รายละเอียดมากแต่ค่อนข้างเสียเวลา (Marsh, 1986)

2. การคำนวณโดยประมาณ

โดยใช้รูปแบบทางคณิตศาสตร์ ดังสมการของ Davis (1970)

$$t = \frac{W}{A \times P \times p}$$

เมื่อ t = อายุการเก็บรักษา
 W = ปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น
 A = อัตราการซึมผ่านของความดันไอน้ำของภาชนะบรรจุ
 (water vapor transmitted rate)
 P = ความแตกต่างระหว่างความดันไอน้ำของผลิตภัณฑ์กับความดันไอน้ำ
 ของบรรยากาศภายนอก ในระหว่างการเก็บรักษา
 p = ความดันของบรรยากาศภายนอก ในระหว่างการเก็บรักษา

ซึ่งถ้าทราบค่า W , A , P และ p จะสามารถคำนวณหาอายุการเก็บรักษาได้
 ค่าดังกล่าวจะได้มาจากการทดลอง การหาอายุการเก็บรักษาด้วยวิธีนี้ ส่วนมากจะเป็นการหา
 อายุการเก็บรักษาจากการเสื่อมเสียเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความชื้น

3. วิธีเร่งการเก็บ (accelerated storage test)

วิธีนี้คล้ายกับการเก็บรักษาจริง แต่จะเร่งเวลาการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์ให้
 เร็วขึ้น โดยการเพิ่มอุณหภูมิหรือความชื้นสัมพัทธ์ เทคนิคที่นำมาใช้ ได้แก่ การคำนวณค่า Q_{10}
 ซึ่งสามารถใช้ทำนายอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิหรือความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ได้ ดัง
 สมการของ Labuza (1982)

$$Q_{10} = \frac{\text{อายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ } T_1}{\text{อายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ } T_1 + 10^\circ\text{C}}$$

$$Q_{10}^{\Delta/10} = \frac{\text{อายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ } T_1}{\text{อายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ } T_2}$$

เมื่อ Δ = ผลต่างของ T_1 และ T_2

4. วิธีการสร้างสถานการณ์จำลอง (simulating shelf life)

เป็นการศึกษาหาอายุการเก็บรักษา ด้วยการเลียนแบบสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริง
 โดยการสร้างสถานการณ์จำลอง แล้วนำปัจจัยต่างๆ เหล่านี้มาพิจารณา จากนั้นจึง
 คำนวณหาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ (Quast และ Karel, 1973)

อายุการเก็บรักษาของแต่ละผลิตภัณฑ์มักกำหนดจากผู้ประกอบการ โดยทั่วไปผู้ผลิตพยายามที่จะกำหนดอายุการเก็บรักษาที่นานที่สุดที่สอดคล้องกับค่าใช้จ่าย รูปแบบการจัดการและการใช้ของผู้จำหน่าย ผู้ค้าปลีก และผู้บริโภค ความสำคัญของการศึกษาอายุการเก็บรักษา คือ สามารถทำให้ผู้ผลิตกำหนดวันหมดอายุของผลิตภัณฑ์ได้อย่างเหมาะสม เพื่อให้ผู้บริโภคได้ทราบและเป็นการประกันว่าผลิตภัณฑ์ในช่วงระยะเวลานั้น มีคุณภาพตรงกับที่แจ้งไว้ในฉลาก การระบุอายุการเก็บรักษาที่ไม่เหมาะสม เช่น นานเกินไป มักนำไปสู่การไม่ยอมรับและการร้องเรียนจากผู้บริโภค หรืออย่างน้อยที่สุดผู้บริโภคเกิดความไม่พอใจ และนำไปสู่การลดลงในเรื่องการยอมรับและยอดขายของยี่ห้อของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการศึกษายุการเก็บรักษาจึงเป็นส่วนสำคัญของการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร (คณาจารย์ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์, 2549)