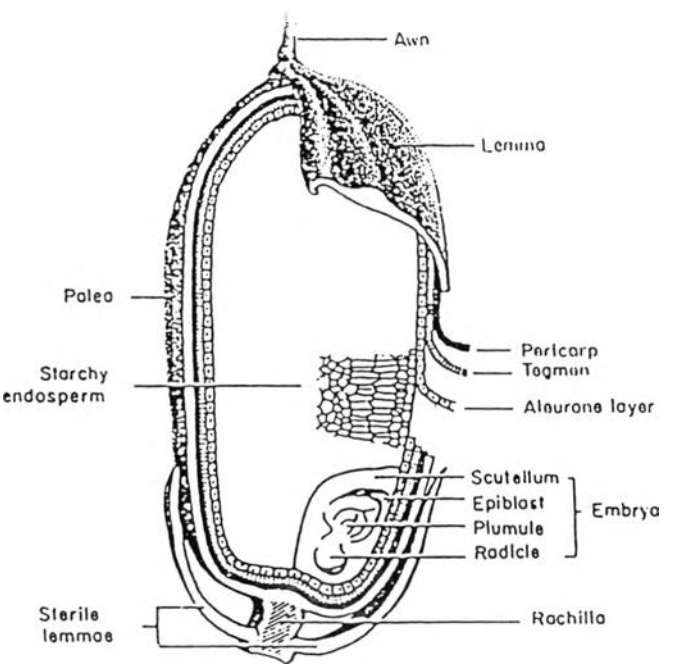
บทที่ 2
วารสารปริทัศน์

2.1 ลักษณะทั่วไปของข้าว

ข้าวเป็นพืชตระกูลหญ้า (semi-aquatic glass plant) ใบเลี้ยงเดี่ยว จัดอยู่ใน genus *Oryza* เติบโตได้ดีทั้งในเขตร้อนและเขตอบอุ่น ข้าวที่บริโภคอยู่ทุกวันนี้มีอยู่ด้วยกัน 2 species คือ *Oryza sativa* L. ซึ่งมีถิ่นกำเนิดแถบทวีปเอเชีย และ *Oryza glaberrima* Steud. ซึ่งมีถิ่นกำเนิดแถบทวีปอัฟริกา แต่ข้าวซึ่งเป็นที่รู้จักและยอมรับกันอย่างกว้างขวาง และทำการผลิตและจำหน่ายกันในทุกวันนี้เกือบทั้งหมดในท้องตลาด รวมทั้งที่ปลูกอยู่ในประเทศไทย คือ *Oryza sativa* L. (Juliano et al., 1990)

โครงสร้างของเมล็ดข้าวแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ ด้วยกัน นั่นคือ (แสดงดังรูปที่ 2.1) (Juliano, 1972)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว (Juliano, 1972)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.1 เปลือกแข็งหุ้มเมล็ด หรือ แกลบ (hull) เป็นส่วนของกลีบดอก (palea และ lemma) ซึ่งห่อหุ้มเมล็ดเอาไว้ภายใน ส่วนนี้มีน้ำหนักประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักเมล็ดข้าว มีปริมาณเซลลูโลส (cellulose) สูงถึงร้อยละ 25 ลิกนิน (lignin) ร้อยละ 30 เพนโทแซน (pentosans) ร้อยละ 15 และปริมาณเถ้าร้อยละ 21 ซึ่งในส่วนของเถ้านี้จะเป็นซิลิกา (silica) ถึงร้อยละ 95 และเนื่องจากแกลบมีประมาณลิกนินและซิลิกาสูง จึงทำให้มีสารอาหารต่ำ ทั้งยังมีมูลค่าต่ำในทางการค้า (Hoseney, 1994)

2.1.2 เปลือกหุ้มผล (pericarp) เป็นเซลล์รูปแท่งห่อหุ้มอยู่รอบเมล็ดตามความยาวของเมล็ด มีอยู่ด้วยกัน 6 ชั้น มีผนังเซลล์บางอยู่ชั้นนอกสุด ผนังเซลล์ของเปลือกหุ้มผลมีความหนา 2 ไมโครเมตร มีองค์ประกอบเคมีเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ให้โครงร่าง เช่น เซลลูโลส ฮีมิเซลลูโลส นอกจากนี้ยังมีโปรตีน ไขมัน รวมทั้งแร่ธาตุต่างๆ มีรายงานว่าเปลือกหุ้มผลมีปริมาณประมาณร้อยละ 5 ของเมล็ด ประกอบด้วยโปรตีนร้อยละ 6 เถ้าร้อยละ 2 เซลลูโลสร้อยละ 20 ไขมันร้อยละ 0.5 อีกร้อยละ 71.5 เป็น nonstarch polysaccharides (Hoseney, 1994) นอกจากนี้ Nagai และคณะ (1960) ยังพบรงควัตถุแอนโธไซยานิน (anthocyanin pigments) ในชั้นนี้ด้วย

2.1.3 เมล็ด ภายในเมล็ดประกอบด้วย

2.1.3.1 เปลือกหุ้มเมล็ด (tegmen หรือ seat coat) เป็นเซลล์ที่มีผนังเซลล์บาง รูปร่างยาวรี อาจมีแถวเดียว สองแถวหรือมากกว่านั้น เซลล์ชั้นในมีสารให้สีอยู่ด้วย ทำให้เปลือกหุ้มเมล็ดมีสีต่างๆ นอกจากนี้ยังเป็นชั้นที่อุดมด้วยไขมัน จึงมีคุณสมบัติในการป้องกันน้ำไม่ให้เข้าสู่เนื้อเมล็ด ชั้นนี้มีความหนาประมาณ 5 ถึง 8 ไมโครเมตร (Hoseney, 1994)

2.1.3.2 ชั้นเยื่อโปร่งใส (hyaline layer หรือ nucellus) อยู่ติดกับชั้นเปลือกหุ้มเมล็ด มีลักษณะโปร่งใส และยังประกอบด้วยสารให้สี เช่นเดียวกับในชั้นเปลือกหุ้มเมล็ด

2.1.3.3 ชั้นแอลิวโรนหรือเยื่อหุ้มเนื้อเมล็ด (aleurone layer) มีลักษณะเป็นเซลล์รูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ มีนิวเคลียสอยู่ตรงกลาง ผนังเซลล์หนา ประกอบด้วยโปรตีน ฮีมิเซลลูโลส และเซลลูโลส โดยในข้าวประกอบด้วยเซลล์ในชั้นนี้ 1 ถึง 7 ชั้น ชั้นแอลิวโรนเป็นชั้นที่สำคัญเพราะอุดมด้วยองค์ประกอบทางเคมีหลายชนิด โดยภายในเซลล์แอลิวโรนจะมีเมล็ดแอลิวโรน (aleurone grain) ขนาดเล็กอยู่มากมาย ซึ่งภายในเมล็ดเป็นกรดไฟติก (สารประกอบของธาตุฟอสฟอรัส)

มีเกลือโพแทสเซียมและแมกนีเซียมรวมทั้งยังอุดมด้วยโปรตีน และไขมัน สะสมอยู่โดยจะห่อหุ้มเมล็ดแอลิวโรนเอาไว้ ทั้งยังอุดมไปด้วยวิตามินต่างๆ เช่น วิตามินบี 1 (thiamin) วิตามินบี 2 (riboflavin) และวิตามินบี 3 (niacin) ซึ่งพบในชั้นนี้มากกว่าในส่วนอื่น

2.1.3.4 คัพภะ (germ หรือ embryo) เป็นส่วนที่จะเจริญเป็นต้นอ่อนของเมล็ด หรือจุดกำเนิดของต้น จึงอยู่ด้านฐานใกล้กับรอยต่อของเมล็ด มีชั้นแอลิวโรนล้อมรอบอยู่ ภายในคัพภะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ คือ ส่วนสกูเทลลัม (scutellum) เป็นเกราะป้องกันอยู่ระหว่างเนื้อเมล็ดกับคัพภะ และส่วนของคัพภะ (embryonic axis) ซึ่งพร้อมจะเจริญเป็นยอดอ่อน ต้น และรากต่อไป ในส่วนนี้จะอุดมไปด้วยสารอาหาร แร่ธาตุ และวิตามินเพื่อการเจริญเติบโต สารอาหารที่มีมากคือโปรตีน (อยู่ในรูป protein bodies) และไขมัน (อยู่ในรูป lipid bodies) ส่วนวิตามินที่มีมาก คือ วิตามินบี และวิตามินอี (tocopheral)

2.1.3.5 เนื้อเมล็ด (endosperm) แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ติดกับชั้นแอลิวโรน (subaleurone layer) เป็นเซลล์ที่มีผนังบาง มีขนาดเล็กรูปลูกบาศก์ ส่วนที่อยู่ถัดไปเป็นเซลล์เนื้อเมล็ด (inner endosperm) ประกอบด้วยเซลล์รูปร่างยาวเป็นแนวรัศมีเข้าสู่จุดกลางเม็ด เซลล์เหล่านี้จะมีผนังเซลล์บาง ส่วนของผนังเซลล์ซึ่งถือเป็นกำแพงห่อหุ้มเซลล์เนื้อเมล็ดนี้ จะประกอบด้วยฮีมิเซลลูโลส เพนโทแซน และเบต้า-กลูแคน (β-glucan) แทบจะไม่มีเซลลูโลสอยู่เลย ส่วนภายในเซลล์เนื้อเมล็ดจะประกอบด้วยสตาร์ชและโปรตีนเป็นส่วนใหญ่ สตาร์ชที่เกิดในผนังเซลล์ของเนื้อเมล็ดจะอยู่รวมกันภายในเม็ดสตาร์ช (starch granule) ซึ่งเม็ดสตาร์ชของข้าวจะมีขนาดเล็กมาก (3-5 ไมครอน) เป็นรูปเหลี่ยม ลักษณะเม็ดส่วนใหญ่จะรวมกันอยู่เป็นกลุ่ม (compound granule) มากถึง 150 เม็ดต่อกลุ่ม แต่ก็พบร่วมอยู่กับเม็ดเดี่ยวเช่นกัน โปรตีนที่พบในเนื้อเมล็ดจะอยู่รวมกับเม็ดสตาร์ชโดยเกาะรวมกันเป็นรูปร่างกลม (protein bodies) ซึ่งพบอยู่ในชั้นติดกับชั้นแอลิวโรนเป็นส่วนใหญ่

เนื้อเมล็ดจะเป็นส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสีข้าว (milling fraction) โดยในการสีข้าวจะนำเมล็ดข้าวมากระเทาะเปลือกเอาเปลือกแข็งหุ้มเมล็ดออก จากนั้นจะได้เป็นข้าวกล้อง นำข้าวกล้องที่ได้มาขัดสีเอาส่วนต่างๆที่ไม่ใช่เนื้อเมล็ดออกเพื่อให้ได้เป็นข้าวสาร ผลพลอยได้จากกระบวนการนี้คือ แกลบ (hull) และรำข้าว (bran and polish)

2.2 การแบ่งลักษณะของข้าว

ข้าวที่คนไทยบริโภคนั้นจำแนกได้ 2 ชนิด คือ ข้าวเจ้า (non-glutinous rice) และข้าวเหนียว (glutinous rice) โดยลักษณะของข้าวเจ้าจะมีเนื้อเมล็ด (endosprem) ค่อนข้างใส ในขณะที่ข้าวเหนียวจะมีเนื้อเมล็ดที่ขุ่นกว่า เมื่อนำไปหุงให้สุกจะมียางเหนียวและเมล็ดเกาะติดกันดี (จำรัส, 2534)

ในสหรัฐอเมริกานิยมแบ่งข้าวตามขนาดและรูปร่างของเมล็ดข้าว โดยถ้าวัดตามความยาวของเมล็ดข้าวจะแบ่งได้เป็น 3 พวก คือ ข้าวเมล็ดสั้น (short grain rice) ขนาดยาวตั้งแต่ 5.5 มิลลิเมตรลงมา ข้าวเมล็ดปานกลาง (medium grain rice) มีขนาดยาว 5.51-6.60 มิลลิเมตร ข้าวเมล็ดยาว (long grain rice) มีขนาดยาว 6.61-7.50 มิลลิเมตร และข้าวเมล็ดยาวมาก (extra long grain rice) มีความยาวมากกว่า 7.5 มิลลิเมตร และสำหรับรูปร่างของเมล็ดข้าว จะแบ่งได้เป็น 3 ประเภท โดยประเมินจากอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างของเมล็ด ได้เป็น ข้าวเมล็ดเรียว (slender grain) มีอัตราส่วนมากกว่า 3.0 ข้าวเมล็ดค่อนข้างเรียว (medium grain) มีอัตราส่วนในช่วง 2.1 ถึง 3.0 และข้าวเมล็ดป้อม (bold grain) มีอัตราส่วนตั้งแต่ 2 ลงมา (Khush et al., 1979)

นอกจากนี้อาจจำแนกโดยใช้ภูมิประเทศ ภูมิอากาศที่ทำการเพาะปลูก และลักษณะทางสันฐานวิทยา แบ่งได้เป็น 3 subspecies คือ ข้าวที่นิยมปลูกในเขตอบอุ่น ลักษณะเมล็ดสั้นป้อม เมื่อหุงสุกแล้วจะมีลักษณะเหนียว นุ่ม เกาะติดกัน เรียกข้าวประเภทนี้ว่า ข้าวจาปอนิก้าหรือข้าวญี่ปุ่น (Japonica rice) ข้าวนิยมที่ปลูกในเขตร้อน เป็นข้าวเมล็ดยาว ลักษณะเมื่อหุงจะร่วน นุ่ม แต่ไม่เกาะกันเป็นกลุ่ม เรียกว่า ข้าวอินดิก้า (Indica rice) ข้าวที่นิยมปลูกกันในหมู่เกาะเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ จะมีลักษณะก้ำกึ่งอยู่ระหว่างข้าวจากปอนิก้าและข้าวอินดิก้า ข้าวประเภทนี้เรียก Bulu หรือข้าวจาวานิก้า (Javanica rice) (Matz, 1959) สำหรับประเทศไทยแล้วข้าวที่ปลูกอยู่มาก คือ ข้าวอินดิก้า ปัจจุบันได้มีการทดลองนำข้าวจาปอนิก้าเข้ามาปลูกทางภาคเหนือของประเทศ เพื่อส่งออกไปขายยังต่างประเทศบ้างเช่นกันแต่ยังไม่เป็นที่แพร่หลาย (ศูนย์วิจัยข้าวแพร่, 2538) สำหรับในงานวิจัยนี้จะนำทั้งพันธุ์ข้าวอินดิก้าและจาปอนิก้ามาใช้ในการทดลอง โดยข้าวจาปอนิก้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ พันธุ์ ก.วก. 1 ซึ่งคัดเลือกมาจากพันธุ์ซาซานิชิกิ ซึ่งกรมวิชาการเกษตรแนะนำให้ปลูกทางภาคเหนือ (ศูนย์วิจัยแพร่, 2538)

มาตรการในการจำแนกข้าวขึ้นอยู่กับปัจจัยและสิ่งแวดล้อมหลายประการด้วยกัน เฉพาะในประเทศไทยมีการจำแนกข้าวออกเป็นหลายรูปแบบด้วยกัน โดยถ้าจำแนกตามฤดูปลูก จะแบ่งเป็นข้าวนาปีหรือข้าวนาน้ำฝน (rainfed rice) เป็นข้าวที่ปลูกในฤดูการทำนาคือเริ่มตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม และเก็บเกี่ยวล่าช้าที่สุดไม่เกินเดือนกุมภาพันธ์ และข้าวนาปรัง (off-season rice) คือ ข้าวที่ปลูกนอกฤดูการทำนาปกติ โดยจะเริ่มตั้งแต่เดือนมกราคม และเก็บเกี่ยวอย่างช้าที่สุดไม่เกินเดือนเมษายน นิยมปลูกในท้องที่ที่มีการชลประทานดี (จำรัส, 2534)

นอกจากนี้ยังสามารถจำแนกข้าวตามลักษณะความไวต่อแสงได้เป็นข้าวไวต่อช่วงแสง (photoperiod sensitive variety) เป็นข้าวที่มีอายุการเก็บเกี่ยวไม่แน่นอน เพราะจะออกดอกในช่วงเดือนที่มีความยาวของกลางวันสั้นกว่ากลางคืน ในประเทศไทยช่วงดังกล่าวเริ่มตั้งแต่เดือนตุลาคม ฉะนั้นข้าวพวกนี้ต้องปลูกในฤดูนาปีหรือฤดูฝนเท่านั้น ถ้านำไปปลูกในฤดูแล้งก็จะออกดอกในเดือนตุลาคมหรือพฤศจิกายนเช่นกัน ข้าวที่ไม่ไวต่อช่วงแสง (non-photoperiod sensitive variety) เป็นข้าวที่มีอายุการเก็บเกี่ยวที่แน่นอน จะออกดอกและเก็บเกี่ยวได้เมื่อครบอายุการเจริญเติบโต โดยช่วงแสงจะไม่มีอิทธิพลในการบังคับให้ข้าวออกดอก (จำรัส, 2534) สำหรับข้าวที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นข้าวนาปีหรือข้าวนาน้ำฝน ซึ่งปลูกที่ศูนย์วิจัยเพื่อเพิ่มผลผลิตทางเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2540 โดย 2 พันธุ์ที่เลือกใช้เป็นข้าวไม่ไวต่อช่วงแสง ได้แก่ พันธุ์ ก.วก. 1 และชัยนาท 1 อีก 3 พันธุ์ คือ ข้าวก่ำดอยสะเก็ด ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียวลันป่าตองเป็นข้าวไวต่อช่วงแสง

นอกจากการแบ่งโดยใช้ลักษณะดังได้กล่าวมาแล้วนั้น ในแง่ของนักบำรุงพันธุ์หรือผสมพันธุ์ข้าวนิยมแบ่งชนิดของข้าวโดยใช้สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของเมล็ดข้าว เพื่อทำการเปรียบเทียบพันธุ์ ปรับปรุงพันธุ์ให้มีคุณภาพการหุงต้ม และการนำไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์ให้ตรงกับความต้องการของผู้บริโภค โดยสมบัติที่ทำการศึกษา เช่น ปริมาณอมัยโลส gelatinized temperature และการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของแป้งระหว่างการหุงต้ม (pasting properties) (งามชื่นและคณะ, 2516; เครือวัลย์และงามชื่น, 2517; งามชื่น, 2520; ดติย, 2538; Hirohata and Chen, 1959; Juliano et al., 1964a; 1964b; Palmino et al., 1968; Hettiarachchy, 1997) ซึ่งสมบัติเหล่านี้มีความสำคัญสำหรับการนำข้าวเข้าจำหน่ายยังตลาดโลก เพื่อให้ตรงตามความต้องการของประเทศผู้ซื้อเช่นกัน

Juliano และคณะ (1990) ทำการเก็บตัวอย่างข้าวจากประเทศไทยที่จะส่งออกไปจำหน่ายยังฮ่องกง, กรุงโรม ประเทศอิตาลี และกรุงบอร์น ประเทศเยอรมัน มาวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพในเมล็ดข้าว พบว่าข้าวเจ้าที่ส่งออกจะเป็นข้าวเมล็ดยาว รูปร่างเรียว มี gelatinized temperature ซึ่งวิเคราะห์เป็นค่าการสลายตัวของเมล็ดข้าวสารในด่าง โดยแช่เมล็ดข้าวสารในด่างค้างคืน แล้วแบ่งระดับการสลายตัวเป็น 7 ระดับ (Little et al., 1958) ถ้าสลายตัวน้อย ระดับการสลายตัวเท่ากับ 1-3 แสดงว่ามี gelatinized temperature สูงกว่า 75 องศาเซลเซียส ถ้าการสลายตัวปานกลาง (ระดับ 4-5) แสดงว่ามี gelatinized temperature ในช่วง 70-75 องศาเซลเซียส ถ้าค่าการสลายตัวเกิดมาก (ระดับ 6-7) แสดงว่ามี gelatinized temperature น้อยกว่า 70 องศาเซลเซียส สำหรับข้าวเจ้าธรรมดา (nonaromatic rice) พบว่ามีปริมาณอมัยโลสปานกลาง (20.1-25%) ถึงสูง (>25%) ในข้าวเจ้าหอม (aromatic rice) มีปริมาณอมัยโลสปานกลาง (20.1-25%) ถึงต่ำ (10–20%) สำหรับข้าวเหนียวที่ส่งออกจะเป็นข้าวเมล็ดยาวหรือเมล็ดปานกลาง มี gelatinized temperature ต่ำ (ระดับ 6-7) แต่โดยหลักแล้วข้าวที่ประเทศไทยส่งออกจะเป็นข้าวหอม ซึ่งมี gelatinized temperature ต่ำ (ระดับ 6-7) และมีอมัยโลสปานกลาง (20.1-25%) ถึงต่ำ(10 – 20%)

2.3 การแปรรูปข้าวเป็นแป้ง

แป้งที่คนไทยเรียกกันทั่วไปสามารถหมายได้ถึงทั้ง ฟลาวร์ (flour) และสตาร์ช (starch) ฟลาวร์และสตาร์ชมีส่วนประกอบทางเคมีต่างกัน จึงส่งผลให้มีสมบัติต่างกัน

ฟลาวร์ หมายถึง ผลิตภัณฑ์แป้งที่ผลิตจากเมล็ด หัว หรือส่วนอื่นที่ใช้บริโภคได้ของพืช โดยนำวัตถุดิบมาสี โม่ หรือบด หรือตีแล้วร่อนเป็นผงละเอียด ดังนั้นส่วนประกอบของฟลาวร์จึงมีสารอาหารต่างๆที่มีอยู่ในวัตถุดิบดั้งเดิมทั้งหมด

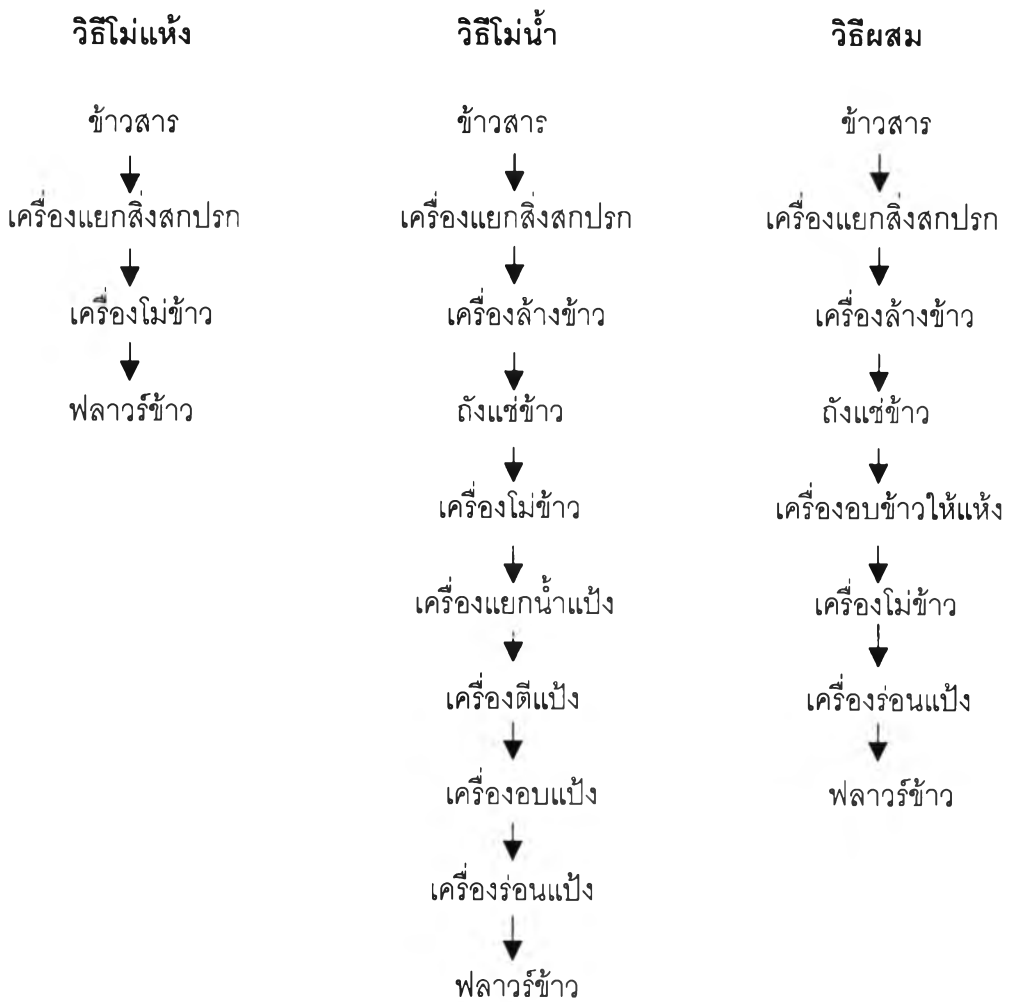
สตาร์ช หมายถึง ผลิตภัณฑ์แป้งที่ผลิตจากส่วนต่างๆของพืชเช่นเดียวกับที่ใช้ผลิตฟลาวร์ แต่กรรมวิธีการผลิตจะแยกเอาเฉพาะส่วนที่เป็นสตาร์ช โดยมีองค์ประกอบอื่นมาปะปนน้อยที่สุด

งานวิจัยนี้จำกัดเฉพาะฟลาวร์ข้าว ดังนั้นเมื่อจะกล่าวถึงฟลาวร์จะใช้คำว่าแป้งแทน และในกรณีที่จะกล่าวถึงสตาร์ช จะใช้ทับศัพท์คำว่า สตาร์ช

แป้งข้าวที่ผลิตในประเทศมี 2 ประเภท คือ แป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว ซึ่งสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ให้นิยามของแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวไว้ตาม มอก. 638-2529 และ มอก. 639-2539 (อุตสาหกรรม, 2529ก; 2529ข) ว่า

แป้งข้าวเจ้า หมายถึง แป้งที่ได้จากข้าวขาว ซึ่งข้าวขาว หมายถึง ข้าวที่เป็นข้าวเต็มเมล็ด ต้นข้าว ข้าวหักใหญ่ ข้าวหักหรือปลายข้าว ที่ได้จากการสีข้าวเปลือกเจ้า ของพืชที่มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Oryza sativa* L. สำหรับแป้งข้าวเหนียวก็มีความหมายเช่นเดียวกับแป้งข้าวเจ้า เพียงแต่เป็นแป้งที่ได้จากข้าวเหนียวเท่านั้น

จากความหมายของแป้งข้าวทางอุตสาหกรรม พบว่าแป้งข้าวที่กล่าวถึงนี้คือ ฟลาวร์ ฟลาวร์ข้าวที่ผลิตในประเทศมีทั้งหมด 3 วิธี (วราทัศน์, 2539) คือ วิธีโม่แห้ง โม่น้ำ และวิธีผสม ขั้นตอนการผลิต แสดงดังรูปที่ 2.2 ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีโม่แห้ง เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการผลิต



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตฟลาวร์ข้าว

2.4 สมบัติทางเคมีของข้าวสาร

องค์ประกอบเคมีในเมล็ดข้าวสาร มีการรายงานไว้เป็นจำนวนมาก และพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างหลากหลาย แสดงได้ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งความหลากหลายขององค์ประกอบเคมีนี้ ปัจจัยหลัก คือ พันธุ์ข้าว และสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการเพาะปลูก รวมไปถึงการดูแลรักษาต้นข้าวขณะเจริญเติบโต นอกจากนี้เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่ต่างกัน ก็ส่งผลให้องค์ประกอบเคมีของงานวิจัยแต่ละงานแตกต่างกัน อีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้องค์ประกอบมีความหลากหลาย คือ ในกระบวนการกระเทาะเปลือกและขัดสี เป็นการยากที่จะให้ข้าวสารมีคุณภาพการขัดสีที่เท่ากัน ข้าวมีความแตกต่างกันทั้งความแกร่งของเมล็ด ขนาดและรูปร่าง พบว่าบางส่วนของคัพภะก็ไม่สามารถขจัดออกอย่างสมบูรณ์โดยการขัดสี (Juliano, 1972)

องค์ประกอบส่วนที่ไม่ใช่สตาร์ช (nonstarch constituents) ซึ่งได้แก่ โปรตีน ไขมัน เส้นใย เถ้าของข้าวกล้อง มีปริมาณสูงกว่าข้าวสาร เนื่องจากองค์ประกอบเหล่านี้มีอยู่ในชั้นเยื่อหุ้มเนื้อเมล็ดในปริมาณสูงกว่าในส่วนเนื้อเมล็ด พิจารณาได้จากตารางที่ 2.1

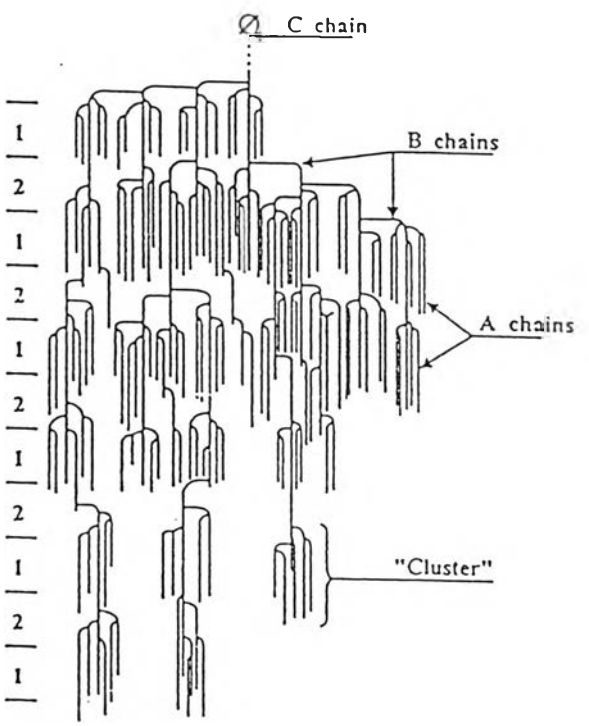
ตารางที่ 2.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของข้าวกล้องและข้าวสารที่รวบรวมจากรายงานการวิจัย

โปรตีน (N × 5.95)	ไขมัน	เส้นใย	เถ้า	NFE*	รายงานวิจัยของ
		ข้าวกล้อง			
7.2 - 10.8	0.6 - 3.1	0.2 – 1.9	0.5 – 2.1	85.2 – 90.2	Hirohata และ Chen (1959)
7.1 - 13.1	2.4 – 3.9	0.8 – 2.6	1.5 – 2.1	79.4 – 88.0	Juliano และคณะ (1964a)
		ข้าวสาร			
6.5 – 9.6	0.3 – 1.1	0.4 – 1.0	0.5 – 1.9	86.9 – 89.8	Hirohata และ Chen (1959)
6.5 – 13.3	0.3 – 0.6	0.1 – 0.6	0.4 – 0.7	86.2 – 92.6	Juliano และคณะ (1964a)

* Nitrogen-free extract หรือปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่ได้จากการคำนวณโดยหักลบ

Champagne (1996) ศึกษาองค์ประกอบเคมีและโครงสร้างของสตาร์ชข้าว โดยรายงานว่า องค์ประกอบหลักของข้าวสาร คือ สตาร์ช พบว่าข้าวสารแห้งมีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบมากถึงร้อยละ 90 อีกร้อยละ 10 เป็นองค์ประกอบของโปรตีน ไขมัน และองค์ประกอบอื่นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สตาร์ชอยู่ในรูปของเม็ดสตาร์ช (starch granule) ซึ่งเม็ดสตาร์ชข้าวมีขนาดเล็กที่สุดในบรรดาธัญชาติด้วยกัน แต่ละเม็ดมีขนาด 3-5 ไมครอน ลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยม (polyhedral) เติบโตในอมัยโลพลาสต์ (amyloplast) หรือคลอโรพลาสต์ (chloroplast) ของเซลล์ เม็ดสตาร์ชข้าวจะอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม (compound granules) แต่ละอมัยโลพลาสต์จะประกอบด้วยเม็ดสตาร์ช 20 – 60 หน่วย อาจมีมากถึง 150 เม็ดต่อกลุ่ม เกาะอยู่ด้วยกัน มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7– 39 ไมครอน

สตาร์ชประกอบด้วยพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส 2 ชนิด คือ อมัยโลส (amylose) และอมัยโลเพคติน (amylopectin) โดยพอลิเมอร์ทั้งสองส่วนนี้จะเกาะเกี่ยวกัน และจัดเรียงตัวในลักษณะโครงสร้างผลึก (semi-crystalline structure) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างของอมัยโลเพคตินที่ประกอบด้วยส่วนผลึก (1) และส่วนอสันฐาน (2) (Robin et al., 1974)

อมัยโลส (amylose)

เชื่อกันมานานแล้วว่าอมัยโลสเป็นพอลิเมอร์สายตรงของน้ำตาลกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α-1,4 glucosidic แต่ปัจจุบันพบว่ามีกิ่งก้านหรือพันธะ α-1,6 glucosidic อยู่ด้วย Hizukuri (1988) พบว่าอมัยโลสจากข้าวอินดิก้ามี β-amylolysis limit อยู่ร้อยละ 73 และข้าวจาปอนิก้ามี β-amylolysis limit อยู่ร้อยละ 81 (ตารางที่ 2.2) กล่าวได้ว่าอมัยโลสจากข้าวอินดิก้ามีส่วนกิ่งก้านมากกว่าข้าวจาปอนิก้า ในขณะที่อมัยโลเพคตินของข้าวมี β-amylolysis limit อยู่เพียงร้อยละ 55 ถึง 60 แสดงให้เห็นว่าอมัยโลเพคตินมีความเป็นกิ่งก้านมากกว่าอมัยโลส

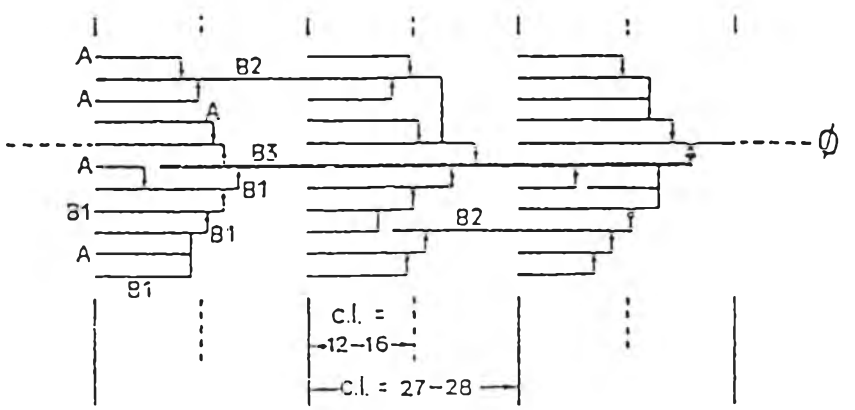
งานวิจัยหลายงานพบว่าปริมาณอมัยโลสขึ้นกับสายพันธุ์ของพืช รวมทั้งภูมิอากาศ และสภาพดินระหว่างที่พืชเจริญเติบโต (Juliano et al., 1964b; Morrison et al., 1984) ข้าวมีอมัยโลสในช่วงตั้งแต่ร้อยละ 0 – 33 ขึ้นกับสายพันธุ์ข้าว ไม่พบรายงานว่าอมัยโลสในข้าวมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 40-80 ต่างจากข้าวโพดซึ่งเป็นธัญชาติเขตเดียวกัน มีอมัยโลสโดยเฉลี่ยร้อยละ 28 แต่พบว่าสามารถดัดแปรให้มีอมัยโลสได้มากถึงร้อยละ 50-80 นอกจากนี้ Asaoka และคณะ (1985) ยังพบว่าการปลูกข้าวในภาวะที่มีอุณหภูมิสูงจะเพิ่มปริมาณอมัยโลสในข้าว ขณะที่อุณหภูมิต่ำจะให้ผลตรงข้าม

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางโครงสร้างของอมัยโลสจากข้าว (Hizukuri, 1988)

	β-amylolysis limit (%)	Avg. Degree of polymerization	Avg. Number Chains	Avg. Chain Length	Branched Molecules (%)
ข้าว					
อินดิก้า	73	1000	4.0	250	49
จาปอนิก้า	81	1100	3.4	320	31

อมัยโลเพคติน (amylopectin)

อมัยโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสที่มีทั้งส่วนที่เป็นสายตรงและกิ่งก้าน ซึ่ง Champagne (1996) พบว่ามีพันธะ α-1,4 glucosidic โดยเฉลี่ยแล้วร้อยละ 96 ในขณะที่มีพันธะ α-1,6 glucosidic โดยเฉลี่ยร้อยละ 4 โครงสร้างของอมัยโลเพคตินที่มีการเสนอเป็นแบบจำลองล่าสุด แสดงดังรูปที่ 2.4 และสมบัติทางด้านโครงสร้างของอมัยโลเพคตินแสดงดังตารางที่ 2.3 นอกจากนี้ Hizukuri (1986) ยังรายงานไว้ว่าในส่วนที่เป็นสายตรงของอมัยโลเพคตินซึ่งอยู่บริเวณส่วนผลึก ยังเกิดการจับกันเป็นเกลียวคู่ (double helix) แสดงดังรูปที่ 2.5 การเกิดเกลียวคู่ของอมัยโลเพคตินต้องใช้พันธะไฮโดรเจนและแรงวันเดอร์วาลในการเชื่อมต่อกัน ทำให้บริเวณที่เป็นเกลียวคู่มีความแข็งแรงมาก ส่งผลให้เม็ดสตาร์ชมีความคงทนต่อการทำปฏิกิริยาด้วยกรดและเอนไซม์

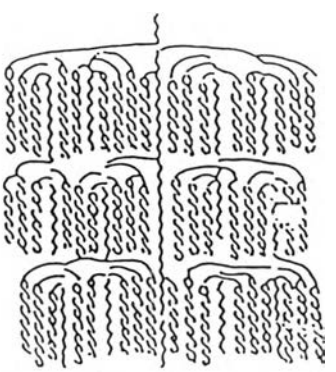


รูปที่ 2.4 แบบจำลองล่าสุดของอมัยโลเพคติน (Hizukuri, 1986)

∅ แสดงถึงส่วนที่เป็นน้ำตาลรีดิวซ์

——— แสดงถึงส่วนของโมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันด้วยพันธะ α-1,4 glucosidic bond

——→ แสดงถึงส่วนของโมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันด้วยพันธะ α-1,6 glucosidic bond



รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างเกลียวคู่ของอมัยโลเพคติน (Hizukuri, 1986)

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางโครงสร้างของอมัยโลเพคติน (Hizukuri, 1988)

	Avg. Degree of polymerization	Avg. Chain Length	Avg. Number Chains	Avg. External Chain Length	Avg. Internal Chain Length
ข้าว					
อินดิก้า	4700	21	200	14	6
จาปอนิก้า	128000	19	670	13	5
ข้าวเหนียว	185000	18	1000	12	5

สำหรับองค์ประกอบอื่นที่พบในสตาร์ชข้าว คือ โปรตีน ไขมัน ฟอสฟอรัส และองค์ประกอบอื่นอีกในปริมาณน้อย ในที่นี้จะกล่าวถึงองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ตัวเท่านั้น คือ โปรตีน และไขมัน

โปรตีน (protein)

โปรตีนพบอยู่บริเวณขอบของเม็ดสตาร์ชหรือฝังอยู่ภายในเม็ดสตาร์ช การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของสตาร์ชกับโปรตีน เกี่ยวข้องกับอมัยโลสและโปรตีน waxy gene (60 kDa) Villareal and Juliano (1989) พบว่าสตาร์ชข้าวเจ้าอินดิก้ามีปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนของสตาร์ชกับโปรตีนสูงกว่าสตาร์ชจากข้าวเจ้าจาปอนิก้าที่มีปริมาณอมัยโลสเท่ากัน

Hamaker (1994) รายงานว่าโปรตีนที่อยู่ในสตาร์ชก่อให้เกิดผลกระทบต่อลักษณะเม็ดสตาร์ช กล่าวคือ ทำให้เกิดประจุบนพื้นผิวเม็ดสตาร์ช มีผลต่อการกระจายของเม็ดสตาร์ช ส่งผลต่อความหนืดของสตาร์ช ทำให้สตาร์ชมีอัตราการดูดซับน้ำ อัตราการพองตัว และอัตราการเกิดเจลาติไนซ์ลดลง ทั้งยังอาจทำให้เกิดปัญหาเรื่องการเกิดฟอง (foaming activity) นอกจากนี้ยังทำให้เกิด Maillard's reaction ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากกรดอะมิโนและน้ำตาลรีดิวซ์ ทำให้สีและกลิ่นของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป

Cagampang และคณะ (1966) ทดลองสกัดโปรตีนออกจากข้าวโดยใช้สารละลายถึง 18 ชนิด พบว่าไม่มีวิธีการสกัดโปรตีนด้วยสารละลายชนิดใดดีเท่ากับการสกัดโดยใช้ด่าง (alkali extraction) เนื่องจากโปรตีนหลักในแป้ง คือ โปรตินกลูเตลินซึ่งละลายได้ดีในด่าง และมีอยู่มากถึง

ร้อยละ 80 ของปริมาณโปรตีนทั้งหมด (Helm and Burks, 1996) แต่เนื่องจากโปรตีนเกาะเกี่ยวกับสตาร์ชอย่างแน่นหนา ดังนั้นการสกัดโปรตีนออกจากฟลาวร์และสตาร์ชให้เหลือน้อยกว่าร้อยละ 0.5 จึงเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก

ด้วยเหตุนี้ในทางอุตสาหกรรมจึงนิยมสกัดโปรตีนออก โดยแช่ข้าวสารในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.3 – 0.5 ที่อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อละลายโปรตีน จากนั้นจึงนำมาโม่ในเครื่อง แล้วทิ้งของผสมที่ได้ไว้ประมาณ 10 – 24 ชั่วโมง จึงนำไปผ่านตะแกรงเพื่อแยกเอาเส้นใยออก แล้วนำไปผ่านเครื่องเหวี่ยงแยก เพื่อให้สตาร์ชตกตะกอนลงมา (Hogan, 1967) นอกจากวิธีปฏิบัติที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นปัจจุบันได้มีการนำเอนไซม์โปรตีเอส (proteases) มาใช้ในการย่อยสลายโปรตีนด้วย เช่น ในงานวิจัยของ Arai และคณะ (1993) ซึ่งสกัดโปรตีนออกจากข้าวโดยใช้เอนไซม์ actinase พบว่าสามารถปรับปรุงการเกิดเจลาติไนเซชัน โดยทำให้ค่า peak viscosity, breakdown viscosity, apparent viscosity, yield stress และ consisitensy index สูงขึ้น

Helm และ Burks (1996) รายงานผลการศึกษาสมบัติของโปรตีนภายในข้าว พบว่าโปรตีนข้าวมีลักษณะคล้ายโปรตีนถั่วเหลือง โดยข้าวมีโปรตีนประมาณร้อยละ 8 ขององค์ประกอบทั้งหมดในเนื้อเมล็ด ทั้งยังพบว่าโปรตีนข้าวเป็นโปรตีนที่ไม่ก่อให้เกิดอาการแพ้ (hypoallergenicity protein) จึงสามารถนำข้าวมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทที่ไม่ก่อให้เกิดอาการแพ้ได้ เช่น ในสูตรอาหารเด็กอ่อน หรือในแป้งที่ใช้สำหรับทาผิว

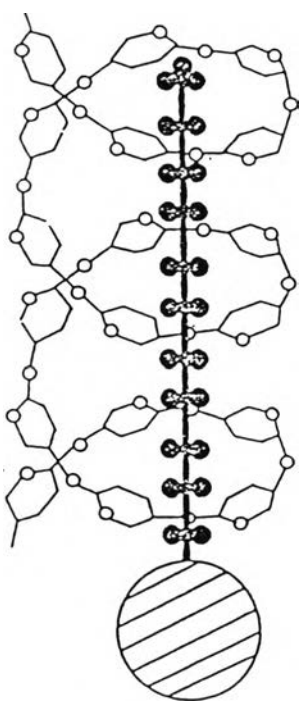
ไขมัน (lipid)

ไขมันภายในเมล็ดจะเป็นหยดกลม (lipid droplets) พบอยู่ใน 2 ลักษณะ คือ อยู่ร่วมกับโปรตีนโดยแทรกอยู่ในชั้นแอลิวโรน หรืออยู่บริเวณผิวเม็ดสตาร์ชหรือขอบของเม็ดสตาร์ช ซึ่งเรียกไขมันพวกนี้ว่า "non-starch lipid หรือ surface lipid" นอกจากนี้ยังพบไขมันภายในเม็ดสตาร์ชโดยจะเชื่อมพันธะอยู่กับโมเลกุลของอมัยโลส และพบไขมันอยู่อย่างอิสระภายในโมเลกุลสตาร์ช ซึ่งไขมันพวกนี้ถูกเรียกว่า "starch lipid หรือ internal lipid" (Morrison, 1981)

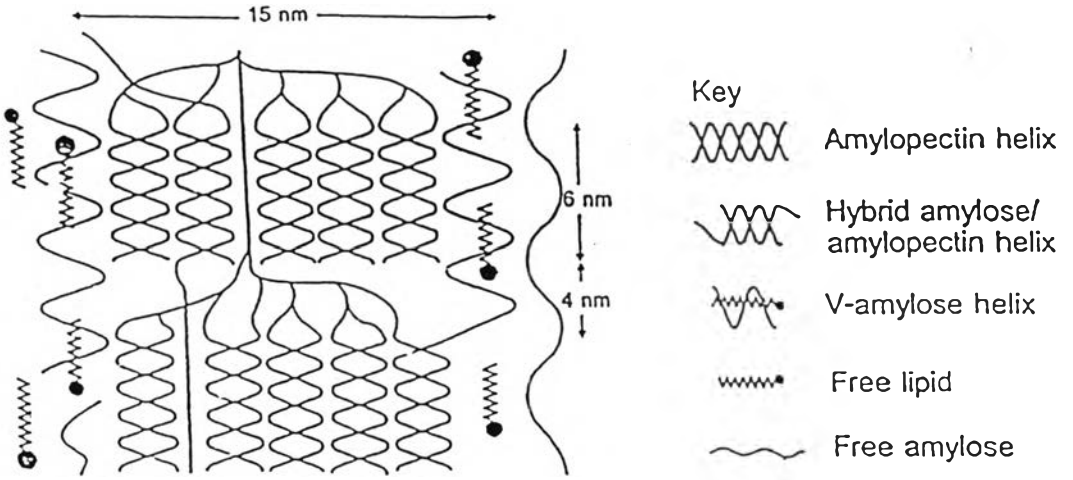
การสกัดไขมันออกจากเมล็ดข้าวนั้น สกัดได้ 2 แบบ คือ สกัดไขมันพวก non-starch lipid หรือ surface lipid ทำได้โดยใช้สารละลายไม่มีขั้ว (nonpolar solvents) เช่น ไดเอทิลอีเทอร์

(diethyl ether) และปิโตรเลียมอีเทอร์ (petroleum ether) เป็นต้น ส่วนไขมันจากสตาร์ช หรือพวก starch lipid สกัดได้โดยใช้สารละลายน้ำกับบิวทานอลที่อิ่มตัว (water-saturated butanol) (Juliano, 1985; James, 1995) ในงานวิจัยใช้การสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ในการวิเคราะห์ไขมัน ดังนั้นปริมาณไขมันจากการทดลองนี้จะเป็นไขมันพวก non starch lipid ชนิดของไขมันที่พบเป็นหลักในองค์ประกอบที่เป็น non-starch lipid คือ ไตรกลีเซอไรด์และกรดไขมันอิสระ ซึ่งเป็นกลุ่มไขมันที่เป็นกลาง ในขณะที่ในเม็ดสตาร์chจะพบฟอสโฟไลปิดในปริมาณสูง กรดไขมันที่พบเป็นองค์ประกอบหลักของไขมันในข้าว คือ ลิโนเลอิก (linoleic) พัลมิติก (palmitic) และโอเลอิก (oleic) (Maningat and Juliano, 1980; Choudhury and Juliano, 1980.; Morrison, et al., 1984; Juliano, 1985; Champagne, 1996; Jane et al., 1996)

ไขมันในสตาร์chเป็นสัดส่วนตรงกับปริมาณอมัยโลสของสตาร์ช และเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอมัยโลสและอมัยโลเพคตินที่มีสายยาวได้ (Choudhury and Juliano, 1980; Morrison et al., 1984; Blanshard, 1987; South et al., 1991) โดยสันนิษฐานว่าลักษณะไขมันที่เกิดพันธะกับอมัยโลสหรืออมัยโลเพคตินสายยาว น่าจะเป็นเช่นเดียวกับแบบจำลองการจับตัวของอมัยโลสกับสารอินทรีย์ ดังรูปที่ 2.6 โดย Blanshard (1987) ได้เสนอแบบจำลองโครงสร้างของอมัยโลสที่อยู่ร่วมกันกับอมัยโลเพคตินและไขมัน ไว้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 แบบจำลองการจับตัวของอมัยโลสกับสารอินทรีย์ (Hoseney, 1994)



รูปที่ 2.7 แบบจำลองโครงสร้างของอมัยโลสที่อยู่ร่วมกับอมัยโลเพคตินและไขมัน (Blanshard, 1987)

Kugimiya และคณะ (1980) และ Zobel และคณะ (1988) ตรวจพบเกลียวของสารประกอบเชิงซ้อนของไขมันและสตาร์ช ภายหลังจากการเกิดเจลาติไนเซชันในสตาร์ช โดย Kugimiya และคณะ (1980) ตรวจสอบโดยการใช้เครื่อง Differential Scanning Colorimeter (DSC) และ Zobel และคณะ (1988) ตรวจสอบโดยใช้เครื่อง X-ray diffraction

Senevigaten และ Biliaderis (1991) และ Morrison และคณะ (1993a) พบว่าสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอมัยโลสและไขมันที่เกิดขึ้นนี้มีความแข็งแรงและทนทานต่อการย่อยด้วยกรดและเอนไซม์ และพบว่าสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นนี้ยังทำให้น้ำแป้งที่สุกมีลักษณะทึบแสงหรือขุ่น นอกจากนี้กรดไขมันไม่อิ่มตัวซึ่งอยู่บริเวณผิวของเม็ดสตาร์ชยังทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชั่น

2.5 สมบัติทางกายภาพที่สำคัญ

สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของแป้งมีดังนี้ คือ

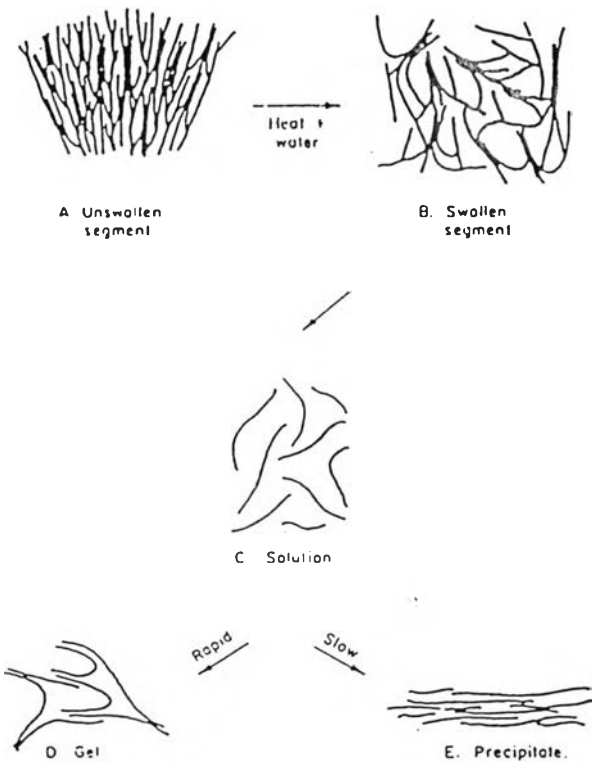
2.5.1 **การพองตัวและการละลาย** (Swelling and Solubility)

สมบัติด้านการพองตัวและการละลายเกิดจากเม็ดสตาร์ชซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักภายในแป้งเกิดการดูดซับน้ำและมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น

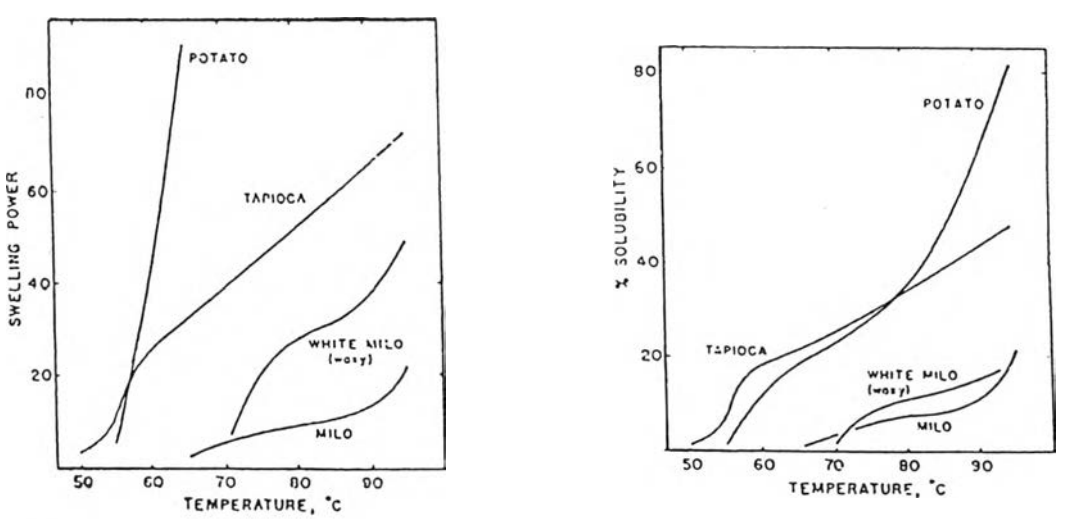
Leach และคณะ (1959) ศึกษาโครงสร้างเม็ดสตาร์ชที่ส่งผลต่อกำลังการพองตัวและร้อยละการละลายของสตาร์ช ใช้วัตถุดิบ คือ สตาร์ชจากมันฝรั่ง (potato starch) มันสำปะหลัง (cassava starch) ข้าวฟ่าง (milo starch) และข้าวฟ่างชนิดที่เป็น waxy (waxy milo starch) โดยอธิบายว่าสตาร์ชมีจัดเรียงตัว ดังรูปที่ 2.8 ส่วนที่เป็นกิ่งก้านของสายพอลิเมอร์และส่วนสายตรงของพอลิเมอร์ภายในเม็ดสตาร์ชจะเรียงตัวขนานกัน โดยมีแรงจากพันธะไฮโดรเจนเชื่อมสายโมเลกุลแต่ละสายเข้าด้วยกัน เกาะเกี่ยวกันเกิดเป็นพื้นที่ส่วนที่เรียกว่า ผลึก (crystalline region) หรือ "ไมเซลล์"(micelles) (รูปที่ 2.8) ส่วนที่เป็นผลึกเกิดจากอมัยโลเพคตินแต่ละโมเลกุลเชื่อมกันเป็นร่างแห 3 มิติ ด้วยพันธะไฮโดรเจน ความแข็งแรงของร่างแหขึ้นอยู่กับจำนวนโมเลกุลที่มาเชื่อมต่อกันและการจัดเรียงโมเลกุลของพอลิแซคคาไรด์ภายในเม็ดสตาร์ช กล่าวได้ว่าส่วนผลึกเกิดจากการจัดเรียงตัวของเกลียวอมัยโลเพคตินที่วางขนานกัน พบว่าสตาร์ชจากธัญชาติมีการเรียงตัวอย่างแน่นหนา ในขณะที่สตาร์ชจากพืชหัวจะมีการเรียงตัวกันแบบหลวมหลวม และสตาร์ชจากพืชรากเกิดการเรียงตัวทั้งสองแบบ ด้วยเหตุที่โครงสร้างต่างกันนี้เองทำให้การพองตัวและการละลายของสตาร์ชทั้ง 3 ประเภทต่างกัน โดยสตาร์ชจากธัญชาติ คือ ข้าวฟ่าง และข้าวฟ่างชนิด waxy มีรูปแบบการละลายและการพองตัว 2 ขั้น แสดงถึงแรงของพันธะภายในเม็ดสตาร์ชที่ต่างกัน 2 ชนิด สตาร์ชจากส่วนราก คือ สตาร์ชมันสำปะหลังมีการพองตัวขั้นเดียว โดยจะพองตัวและละลายสูงกว่าสตาร์ชธัญชาติ ส่วนสตาร์ชจากพืชหัว คือ สตาร์ชมันฝรั่งมีการพองตัวขั้นเดียว และพองตัวสูง เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวภายในอ่อนแอ ซึ่งรูปแบบการพองตัวและการละลายของสตาร์ชทั้งหมดนี้จะแสดงในรูปที่ 2.9

สตาร์ชไม่ละลายน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่า gelatinized temperature ของสตาร์ชชนิดนั้นๆ แม้ว่าในโมเลกุลของสตาร์ชจะประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมาก มีสมบัติชอบน้ำ แต่เนื่องจากเม็ดสตาร์ชเกาะกลุ่มกันด้วยพันธะไฮโดรเจนอยู่ในร่างแหไมเซลล์ พันธะไฮโดรเจนเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ชที่อยู่ใกล้ๆกัน และการจัดเรียงตัวทำให้สตาร์ชละลายในน้ำเย็นได้ยาก แต่พบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า gelatinized temperature เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวได้

เล็กน้อย เนื่องจากภายในเม็ดสตาร์ชประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมาก น้ำหรือของเหลวจึงสามารถแพร่ผ่านเข้าไปในร่างแหไมเซลล์ในเม็ดสตาร์ชได้อย่างอิสระ และเม็ดสตาร์ชมีการดูดซับน้ำไว้ โดยปริมาณน้ำที่เม็ดสตาร์ชดูดซับขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ปริมาณน้ำ รวมทั้งชนิดของสตาร์ช (Leach, 1965)



<u>รูปที่ 2.8</u> โครงสร้างและการพองตัวของเม็ดสตาร์ช (Schoch and Elder, 1955)



<u>รูปที่ 2.9</u> รูปแบบการพองตัวและการละลายของสตาร์ชบางชนิด (Leach et al., 1959)

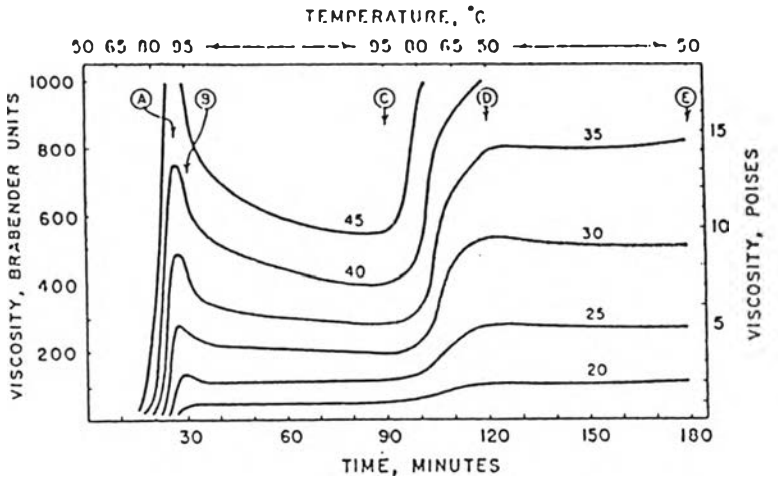
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อมีการให้ความร้อนแก่น้ำแป้งจนมีอุณหภูมิสูงกว่า gelatinized temperature พันธะไฮโดรเจนภายในเม็ดสตาร์ชจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่อิสระ เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวขึ้น และสตาร์ชบางส่วนจะละลายออกมา กำลังการพองตัวของสตาร์ชจะแสดงเป็นปริมาตรหรือน้ำหนักของเม็ดสตาร์ชที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเม็ดสตาร์ชพองตัวสูงสุด สำหรับความสามารถในการละลายจะแสดงเป็นน้ำหนักของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่สามารถละลายได้ (Schoch, 1964)

ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้งมีหลายประการ โดย Leach และคณะ (1959) รายงานว่า ชนิดของสตาร์ช ความบริสุทธิ์ของสตาร์ช ความแข็งแรงและลักษณะร่างแหภายในเม็ดสตาร์ช การดัดแปรทางเคมี และพันธุ์ ล้วนเป็นปัจจัยสำคัญทั้งสิ้น

2.5.2 **ความหนืด**

ความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของแป้ง เป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เกิดเมื่อน้ำแป้งได้รับความร้อน เม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำและพองตัวขึ้น ทำให้น้ำบริเวณรอบๆ เม็ดสตาร์ชเหลือน้อยลง เม็ดสตาร์ชจึงเคลื่อนไหวได้ยาก เกิดเป็นความหนืดขึ้น ซึ่งการตรวจวัดความหนืดทำได้หลายวิธี เครื่องมือที่ใช้ในการวัดก็มีหลายชนิด แต่ละชนิดก็มีหลักการทำงานและการอ่านค่าความหนืดที่ต่างกันไป เช่น เครื่อง Brookfield viscometer จะวัดความหนืดที่อุณหภูมิหนึ่ง โดยใช้หลักการหมุนของวัตถุทรงกระบอกหรือแผ่นจานในของเหลวด้วยอัตราเร็วคงที่ ค่าความหนืดที่เกิดขึ้นวัดได้จากค่าความต้านทานการหมุนของของเหลวที่อัตราเร็วคงที่ หน่วยความหนืดเป็นเซนติพอยส์ (centipoise) นอกจากนี้ยังมีการใช้ Brabender viscoamylograph ติดตามการเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำแป้งในระหว่างการให้ความร้อนจนถึงขั้นการทำให้เย็น โดยน้ำแป้งจะได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที และคงที่ไว้ระยะเวลาหนึ่งที่อุณหภูมินี้ จากนั้นจึงทำให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที และคงที่ไว้อีกระยะเวลาหนึ่ง ติดตามผลและแสดงผลในรูปของ Brabender viscoamylogram ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป หน่วยความหนืดที่ใช้เป็น Brabender unit (B.U.) ลักษณะของ Brabender viscoamylogram แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 Brabender viscoamylogram ของสตาร์ชข้าวโพดที่ความเข้มข้นต่างๆ (Mazurs et al., 1957)

Mazurs และคณะ (1957) ได้เสนอจุดวิกฤต 5 จุดบน viscoamylogram (รูปที่ 2.10) คือ ความหนืดสูงสุด (peak viscosity หรือจุด A) ความหนืดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส (จุด B) ความหนืดภายหลังจากคงที่ไว้ที่ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (จุด C) จุดที่ความหนืดเท่ากับ 50 องศเซลเซียส (จุด D) และจุดสุดท้ายคือที่ความหนืด 50 องศาเซลเซียสหลังจากคงที่ไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (จุด E) นอกจากการวิเคราะห์โดยวิธีนี้แล้ว Leelavathi และคณะ (1987) ได้เสนอวิธีจำแนกแป้งจากพืชชนิดต่างๆ โดยจะพิจารณาจุดสำคัญ คือ peak viscosity (P) hot paste viscosity (H) cold paste viscosity (C) คำนวณค่า breakdown (H/P) setback (C/P) total setback (C/H) และ relative breakdown {(P-H)/(C-H)} แต่ในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ผลของ Brabender viscoamylogram โดยพิจารณาจาก

- pasting temperature หรืออุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มปรากฏ แสดงถึงการเกิดเจลาติไนซ์ขึ้น
- peak viscosity คือ ความหนืดสูงสุดของน้ำแป้ง เป็นจุดที่เม็ดสตาร์ชพองตัวเต็มที่
- peak temperature คืออุณหภูมิที่ความหนืดของน้ำแป้งสูงสุด หรืออุณหภูมิที่เกิด peak viscosity จะเรียกช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ที่ความหนืดเริ่มปรากฏจนความหนืดมีค่าสูงสุดว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชัน หรือ gelatinized temperature range

- ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ชี้ให้เห็นถึงความยากง่ายในการหุงต้ม

- ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส หลังจากคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นระยะเวลาหนึ่ง ในการทดลองนี้ใช้เวลา 20 นาที จุดนี้จะชี้ให้เห็นถึงความคงตัวของน้ำแป้งสุก

- ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ชี้ให้เห็นถึงการเกิดรีโทรเกรเดชันเนื่องจากการทำให้เย็น

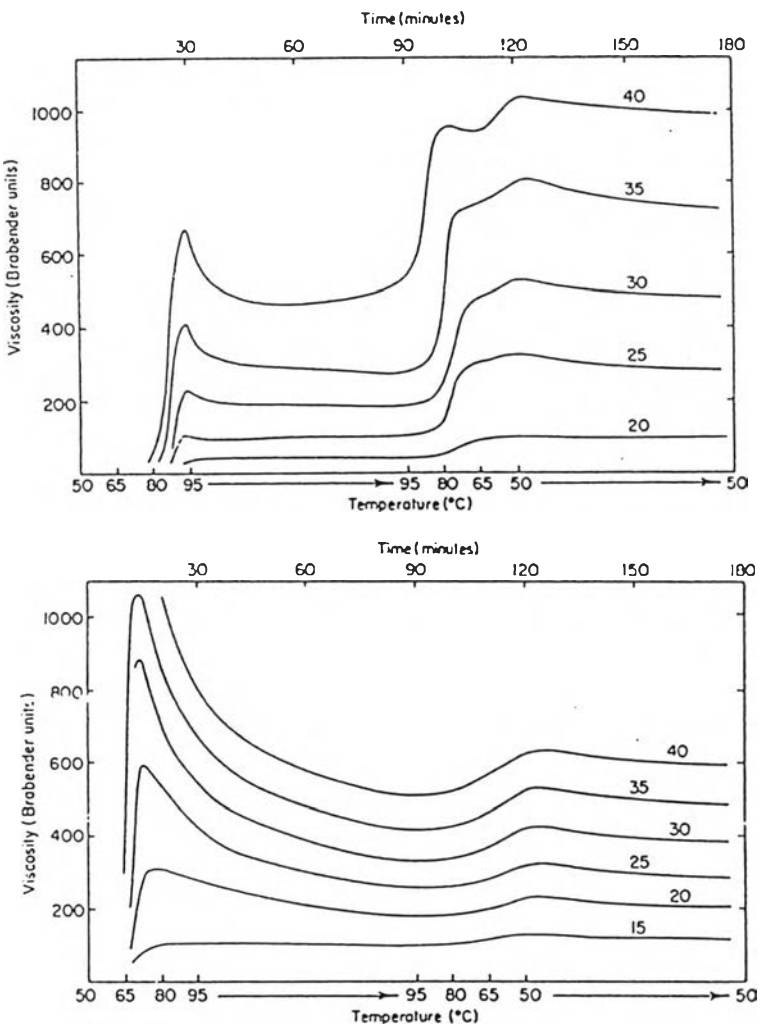
- ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส หลังจากคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นระยะเวลาหนึ่ง ในการทดลองนี้ใช้เวลา 20 นาที จุดนี้จะชี้ให้เห็นถึงความคงตัวของน้ำแป้งสุกที่ผ่านการให้ความร้อน แล้วนำมาทำให้เย็น

- breakdown เป็นค่าถึงแสดงถึงเสถียรภาพต่อแรงเฉือนของเม็ดสตาร์ชขณะพองตัว มีการคิดคำนวณแตกต่างกันไป เช่น เป็นผลต่างระหว่างค่า peak viscosity กับความหนืดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส หลังจากคงที่ที่อุณหภูมินี้ไว้ระยะเวลาหนึ่ง (Halick and Kelly, 1959; Deffenbaug and Walker, 1989) หรือผลต่างระหว่างความหนืดเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสกับความหนืดสุดท้ายของอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส (Mazurs et al., 1957) ซึ่งเป็นที่นิยมกันมาก แต่การคำนวณโดยใช้วิธีนี้จะเกิดปัญหา ในกรณีที่ความหนืดที่อุณหภูมิเริ่มต้น 95 องศาเซลเซียสหรือ peak viscosity มีค่าต่ำกว่าค่าความหนืดสุดท้ายที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส จะทำให้ได้ค่า breakdown ติดลบ ซึ่งทำให้เกิดปัญหาเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงคำนวณค่า breakdown จากผลหาระหว่าง peak viscosity กับค่าความหนืดสุดท้ายที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ซึ่งถ้าแป้งมีค่านี้ต่ำกว่าหรือเท่ากับ 1 แสดงว่าแป้งชนิดนี้ไม่มี breakdown หรือเม็ดสตาร์ชขณะพองตัวมีความทนต่อแรงเฉือนมาก เม็ดสตาร์ชขณะพองตัวจะมีเสถียรภาพมาก ถ้ามีค่า breakdown สูงกว่า 1 แสดงว่าเม็ดสตาร์ชขณะพองตัวมีเสถียรภาพหรือความทนต่อแรงเฉือนต่ำ โดยถ้าสูงกว่า 1 มาก เม็ดสตาร์ชก็จะทนต่อแรงเฉือนได้ต่ำมาก หรือมีเสถียรภาพของเม็ดสตาร์ชต่ำมากนั่นเอง

- setback เป็นค่าที่แสดงถึงการเกิดรีโทรเกรเดชัน หรือการคืนตัวของสตาร์ช มักคำนวณโดยใช้ผลต่างระหว่างความหนืดที่อุณหภูมิเป็น 50 องศาเซลเซียส กับ peak viscosity ซึ่งการคำนวณโดยใช้วิธีนี้อาจให้ค่าติดลบ ในกรณีที่ความหนืดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสมีค่าต่ำกว่า peak viscosity จะทำให้เกิดปัญหาในการวิเคราะห์ผลทางสถิติ ดังนั้นงานวิจัยนี้จะพิจารณาการเกิดรีโทรเกรเดชันโดยใช้ค่าผลหาระหว่างความหนืดที่อุณหภูมิเริ่มต้น 50 องศาเซลเซียสกับค่า peak viscosity ถ้าค่า setback ต่ำกว่าหรือเท่ากับ 1 แสดงว่าแป้งไม่มี setback

หรือไม่เกิดรีโทรเกรเดชั่น แต่ถ้าค่า setback สูงกว่า 1 แสดงว่าแป้งชนิดนี้เกิดรีโทรเกรเดชั่น โดยถ้าค่ายิ่งสูงกว่า 1 มาก ก็จะเกิดรีโทรเกรเดชั่นหรือการคืนตัวของสตาร์ชมาก

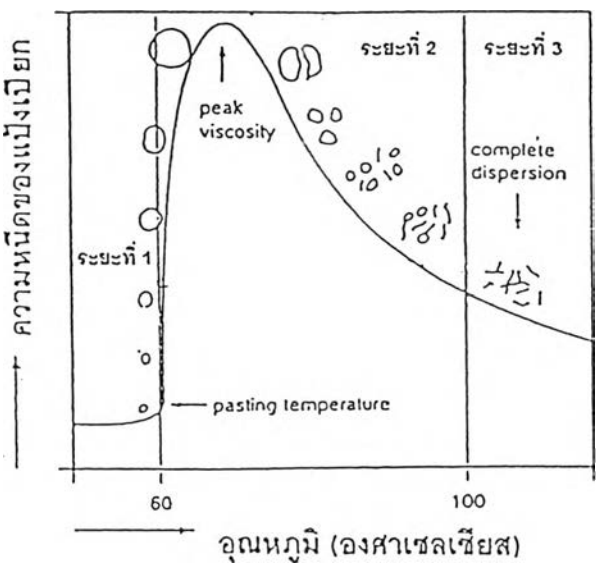
การศึกษาความหนืดด้วยเครื่อง Brabender viscoamylograph นอกจากจะวิเคราะห์ผลด้านความหนืด ยังสามารถใช้อธิบายการเกิดเจลาติไนเซชันและการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เครื่องมือชนิดนี้ในการติดตามวัดความหนืด เพื่อนำผลที่ได้มาอธิบายถึงปรากฏการณ์การเกิดเจลาติไนซ์และการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งข้าว ในที่นี้จะพบว่าแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวจะมี viscoamylogram ที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 2.11



<u>รูปที่ 2.11</u> Brabender viscoamylogram ของแป้งข้าวเจ้า (รูปบน) และแป้งข้าวเหนียว (รูปล่าง) ทางการค้า ที่ความเข้มข้นต่างๆ ตัวเลขบนกราฟแต่ละเส้นจะบอกถึงน้ำหนักของแป้งที่นำมาละลายในน้ำ 500 มิลลิลิตร แล้วนำเข้าเครื่อง Brabender viscoamylogram โดยใช้วิธีของ Mazurs และคณะ (1957) ในการทำการทดลอง (Schoch, 1967)

2.5.3 การเกิดเจลาติไนเซชัน (Gelatinization)

การเกิดเจลาติไนเซชันอาจแบ่งได้เป็น 3 ระยะ อธิบายได้ตามรูปที่ 2.12 ดังนี้คือ



รูปที่ 2.12 ระยะในการเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดสตาร์ช (Sanders, 1996)

ระยะที่ 1 เป็นระยะที่น้ำแป้งไม่ละลายในน้ำเย็น เกิดการดูดซึมน้ำเย็นและการพองตัวอย่างจำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยไม่เพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด เม็ดสตาร์ชคงรักษารูปร่างและโครงสร้าง birefringence ได้ ระยะที่ 2 คือ เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งจนมีอุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้พันธะไฮโดรเจนหรือ water bridge คลายตัวลง ร่างแหระหว่างไมเซลล์ภายในเม็ดสตาร์ชอ่อนแอลง เม็ดสตาร์ชจะดูดน้ำและพองตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้น้ำบริเวณรอบเม็ดสตาร์ชเหลือน้อยลง เม็ดสตาร์ชเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น จึงเกิดความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว น้ำแป้งมีความใสเพิ่มขึ้น สตาร์ชที่ละลายได้เริ่มละลายออกมา เม็ดสตาร์ชมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และโครงสร้าง birefringence หายไป ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า "การเกิดเจลาติไนเซชัน" (gelatinization) อุณหภูมิที่เม็ดสตาร์ชเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และโครงสร้าง birefringence หายไป เรียกว่า gelatinized temperature นิยมตรวจสอบด้วยเครื่อง Kofler hot-stage microscope ซึ่งจะติดตามการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและโครงสร้าง birefringence ของเม็ดสตาร์ชเมื่อถูกให้ความร้อน โดยสังเกตผ่านกล้องจุลทรรศน์ แต่ถ้าตรวจวัดด้วยเครื่อง Brabender viscoamylograph จะเรียก

อุณหภูมินี้ว่า อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด หรือ pasting temperature เมื่อเกิดการเจลาติไนเซชันพบว่าความหนืดของน้ำแป้งจะสูงสุดที่อุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งถือเป็นอุณหภูมิที่เม็ดสตาร์ชพองตัวได้สูงสุด เรียกอุณหภูมิ ณ จุดนี้ว่า peak temperature และเรียกความหนืดสูงสุดที่เกิดขึ้นว่า peak viscosity เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาต่อไปอีกจะทำให้โครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย ส่งผลให้ความหนืดลดลง ถ้ามีการให้ความร้อนต่อไป ความหนืดจะลดลงเรื่อยๆจนเข้าสู่ระยะที่ 3 ซึ่งพบว่าเม็ดสตาร์ชจะมีรูปร่างไม่แน่นอน พันธะภายในเม็ดสตาร์ชเกิดการแตกออกอย่างสมบูรณ์ (Olkku and Rha, 1978; Blanshard, 1979; Sanders, 1996) นอกจากการตรวจสอบ gelatinized temperature โดยการใช้เครื่อง Kofler hot-stage microscope และเครื่อง Brabender viscoamylograph แล้ว พบว่าในเมล็ดข้าวจะนิยมตรวจ gelatinized temperature โดยวัดค่าการสลายตัวของเมล็ดข้าวในด่าง (Little et al., 1958) สำหรับในงานวิจัยนี้จะตรวจวัดการเกิดเจลาติไนซ์ด้วยเครื่อง Brabender viscoamylograph

2.5.4 **การเกิดรีโทรเกรเดชัน** (Retrogradation)

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึง gelatinized temperature แล้วให้ความร้อนต่อไปจะทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก จุดที่เม็ดสตาร์ชถูกทำลายนี้เองจะทำให้ความหนืดของน้ำแป้งลดลง โมเลกุลของอมัยโลสและอมัยโลเพคตินกระจายออกมา เมื่อปล่อยให้น้ำแป้งสุกหรือ paste เย็นตัว โมเลกุลที่อยู่ใกล้กัน โดยเฉพาะโมเลกุลของอมัยโลสจะจัดเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติโครงสร้างใหม่ที่สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดเพิ่มขึ้นและคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะขุ่นและทึบแสง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า "การเกิดรีโทรเกรเดชัน" หรือ "การคืนตัวของสตาร์ช" พบว่าถ้าการคืนตัวของสตาร์ชเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จะเกิดการตกตะกอนของอนุภาคสตาร์ช แต่พบว่าถ้าการคืนตัวเกิดอย่างรวดเร็ว จะเกิดเป็นเจลขุ่น ดังรูปที่ 2.8 เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีก ลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า "การแยกตัวของน้ำ" (syneresis)

ปริมาณ มวลโมเลกุล รวมทั้งโครงสร้างของอมัยโลสมีความสำคัญต่อการคืนตัวของสตาร์ช สตาร์ชที่มีอมัยโลสสูงเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าสตาร์ชที่มีอมัยโลเพคตินสูง นอกจากปริมาณอมัยโลสและอมัยโลเพคตินที่มีในสตาร์ชแล้ว การคืนตัวของสตาร์ชยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอีกหลายประการ อันได้แก่ ชนิดของสตาร์ช พันธุ์ ความเข้มข้นของสตาร์ช กระบวนการให้

ความร้อน ความเย็น อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน ความเป็นกรดเบสของสารละลาย รวมทั้งองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆในสตาร์ช เช่น เกลือ น้ำตาล ไขมัน เป็นต้น (Orford et al., 1987; Fan and Marks, 1998)

งานวิจัยหลายงานที่พบว่าสมบัติทางเคมีส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของแป้งข้าว และพบว่าแป้งข้าวจากต่างพันธุ์จะมีสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่แตกต่างกัน เช่น

Juliano และคณะ (1964a) ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวเจ้า 16 พันธุ์ ซึ่งเป็นข้าวอินดิก้า 12 พันธุ์ ข้าวจาปอนิก้า 4 พันธุ์ พบความสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์และองค์ประกอบทางเคมีของข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวนึ่ง ทั้งยังพบว่าสมบัติเคมีกายภาพมีความสัมพันธ์กับคุณภาพการหุงอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง และพบว่าข้าวอินดิก้ามีสมบัติเคมีกายภาพหลากหลายกว่าข้าวจาปอนิก้า

Juliano และคณะ (1964b) ตรวจสอบสมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของข้าว 55 พันธุ์ ที่มาจาก 5 ประเทศทางแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ คือ อินโดนีเซีย มาลายา ฟิลิปินส์ เวียดนาม และไทย โดยเป็นพันธุ์ข้าวเจ้า 51 พันธุ์ และพันธุ์ข้าวเหนียว 4 พันธุ์ พบว่าสมบัติทางเคมีและกายภาพของข้าวแต่ละพันธุ์มีความแตกต่างกันอย่างมาก โดยพบว่ามีปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วงตั้งแต่ร้อยละ 5.74 ไปจนถึง 10.98 ปริมาณอมัยโลสมีตั้งแต่ร้อยละ 2.9 ไปจนถึง 31.8 gelatinized temperature ซึ่งตรวจสอบโดยใช้ Brabender viscoamylograph เตรียมความเข้มข้นน้ำแป้งร้อยละ 10 และวิเคราะห์ตามวิธีของ Halick และ Kelly (1959) มีตั้งแต่อุณหภูมิ 56.5 ถึง 71 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่าค่า peak viscosity อยู่ในช่วงตั้งแต่ 510 ถึง 1085 B.U. การลดลงของความหนืดในช่วงคงที่อุณหภูมิที่ 94 องศาเซลเซียส อยู่ในช่วงตั้งแต่ 40 ถึง 625 B.U. ค่า setback อยู่ในช่วงตั้งแต่ –405 จนถึง +620 B.U.

Hettiarachchy และคณะ (1997) ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าว 3 พันธุ์ โดยใช้เครื่อง Universal texture analyzer และ Brabender viscoamylograph ศึกษาสมบัติด้านเนื้อสัมผัส (textural properties) กับ pasting properties ตามลำดับ พบว่า pasting properties มีความสัมพันธ์กับสมบัติด้านเนื้อสัมผัสซึ่งเป็นผลที่ได้จากการหุงอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่าพันธุ์ที่ต่างกันจะให้สมบัติด้านเนื้อสัมผัสและ pasting properties แตกต่างกัน โดยพบว่าเจลของ

ข้าวพันธุ์ La Grue ซึ่งเป็นข้าวเมล็ดยาว จะมีค่า fracturability และ hardness รวมทั้ง amylograph consistensy และ setback สูงที่สุด เจลของข้าวพันธุ์ S201 ซึ่งเป็นข้าวเมล็ดสั้น มีค่าต่างๆที่กล่าวถึงในข้างต้นรองลงมา และเจลของข้าวพันธุ์ Bengal ซึ่งเป็นข้าวเมล็ดปานกลาง จะมีค่าเหล่านี้ต่ำสุด และเมื่อนำเจลที่ได้ไปย่อยด้วยเอนไซม์ α-amylase จากน้ำลายมนุษย์ เป็นเวลา 15 และ 45 นาที พบว่าเจลของข้าวพันธุ์ La Grue ให้ปริมาณมอลโทสต่ำกว่าเจลของข้าวอีก 2 พันธุ์ที่เหลืออย่างมีนัยสำคัญ โดยที่เวลา 45 นาที เจลข้าวพันธุ์ La Grue ให้ปริมาณมอลโทสในอัตราที่ช้ากว่าเจลของ S201 และ Bengal แม้ว่าจะมีอมัยโลส (35.77%) สูงกว่าข้าวอีก 2 พันธุ์ คือ La Grue(25.57%) และ S201(21.60) แต่พบว่าเมื่อย่อยเป็นเวลา 90 นาที ข้าวทั้ง 3 พันธุ์นี้จะให้ปริมาณมอลโทสไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ การที่ในเวลาช่วงแรกให้อัตราการย่อยที่แตกต่างกันนั้น Hettiarachchy และคณะ สรุปว่าเป็นเพราะเจลข้าวพันธุ์ La grue มีค่า gelatinized temperature สูงกว่าแป้งข้าวอีก 2 พันธุ์ที่เหลือ

จะเห็นว่าพันธุ์ที่หลากหลายจะมีองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพแตกต่างกันไป พบว่าองค์ประกอบเคมีที่มีความสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพและมีการศึกษาวิจัยกันอย่างแพร่หลาย คือ ปริมาณอมัยโลส โปรตีน และไขมัน ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงอมัยโลสที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ ยกตัวอย่างเช่น

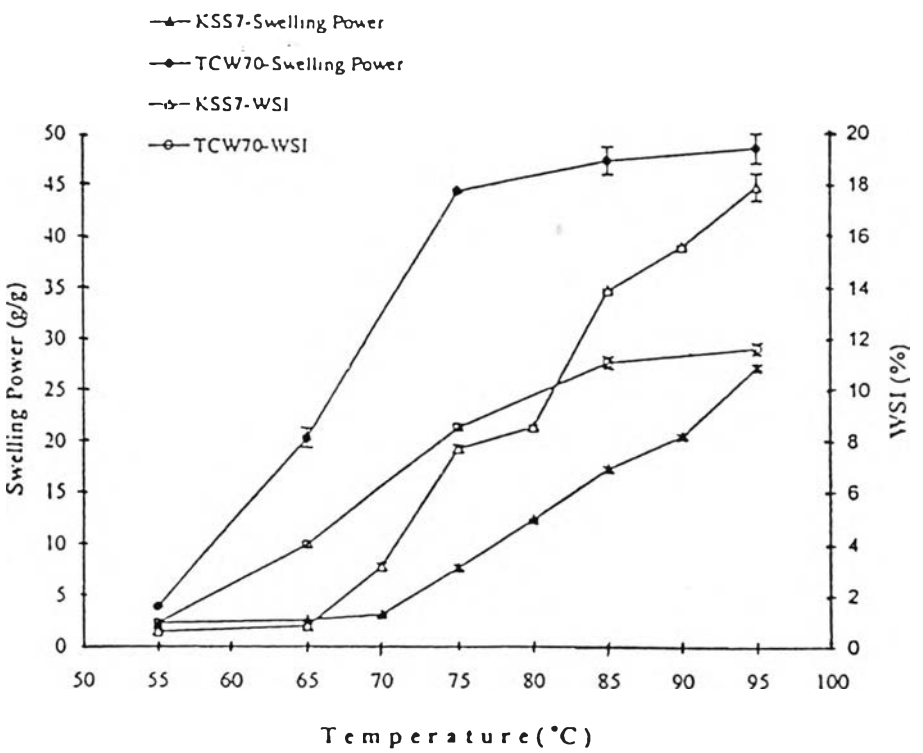
Reddy และคณะ (1994) ศึกษาสมบัติด้านความหนืด (viscoelastic properties)ของเพสต์แป้งข้าว (rice-flour paste) และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอมัยโลสกับคุณภาพของข้าว ศึกษาโดยใช้แป้งข้าว 15 พันธุ์ ทำการเตรียมเพสต์แป้งข้าวโดยใช้เครื่อง Brabender viscograph ตามวิธีของ Sandhya Rani และ Bhattachayya (1985; 1989) ให้ความร้อนกับน้ำแป้งถึงอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสภายในเวลา 40 นาที เมื่ออุณหภูมิถึง 95 องศาเซลเซียสแล้วจะนำเพสต์แป้งข้าวออกมา 50 กรัมมาทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ส่วนที่เหลือให้นำมากวนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาวิเคราะห์ viscoelastic properties โดยใช้ oscillatory and stress relaxation test ซึ่งจากงานวิจัยของเขาจะวิเคราะห์ปริมาณอมัยโลสในเทอมของค่าสมมูลอมัยโลส (Amylose Equivalent หรือ AE) ซึ่งเป็นค่าที่ประกอบด้วยอมัยโลสที่แท้จริง (true amylose หรือ soluble AE) และอมัยโลเพคติน (amylopectin หรือ insoluble AE เป็นดัชนีที่ใช้ในการบ่งบอกถึงปริมาณอมัยโลเพคตินสายยาวที่สามารถเกิดพันธะกับไอโอดีนได้) ในที่นี้พบว่าเม็ดสตาร์ชของแป้งข้าวที่มีค่า AE สูงจะแข็งแรง

คงทน และมีความยืดหยุ่น (elastic) สูงกว่าเม็ดสตาร์ชของแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวที่มี AE ต่ำ ซึ่งเม็ดสตาร์ชจากข้าวพวกนี้มีพันธะที่อ่อนแอ ไม่ยืดหยุ่น (inelastic) และเปราะ (fragile) นอกจากนี้ยังพบว่าพันธุ์ที่ให้ค่า AE สูง จะให้ข้าวสุกที่ค่อนข้างแห้ง เนื้อแน่นหรือหุงขึ้นหม้อ และเป็นข้าวที่ไม่เหนียวแฉะ ส่วนเพสต์แป้งข้าวที่ได้ก็จะมีความแข็งแรงและยืดหยุ่นสูง (strong and elastic paste)ในขณะที่พวกที่มีค่า AE ต่ำหรือพวกข้าวเหนียวจะให้ข้าวสุกที่ชื้น เหนียว และนุ่ม โดยที่เพสต์ข้าวที่ได้จะมีลักษณะอ่อนแอ (thin and weak paste)

Lii และคณะ (1996) ศึกษาถึงผลของพันธุ์ข้าวและปริมาณอมัยโลสที่มีต่อสมบัติทางด้านการไหล (rheological properties) ของสตาร์ชข้าว โดยใช้ mechanical spectrometer ในการตรวจสอบวัตถุดิบ ได้แก่ ข้าวพันธุ์ Kaoshiung Sen 7 หรือ KSS7 ซึ่งเป็นข้าวเจ้าอินดิก้า และพันธุ์ Taichung waxy 70หรือ TCW70 ซึ่งเป็นพันธุ์ข้าวเหนียว พบว่าข้าวทั้งสองพันธุ์นี้มีปริมาณอมัยโลสร้อยละ 25.6 และ 0.99 ตามลำดับ มี gelatinized temperature (onset) ซึ่งตรวจสอบด้วย DSC เท่ากับ 72 และ 64 องศาเซลเซียสตามลำดับ เมื่อศึกษากำลังการพองตัว (swelling power) และการละลาย (water solubility index) พบว่ามีกำลังการพองตัวและการละลาย แสดงดังรูปที่ 2.13 ซึ่งพบว่ากำลังการพองตัวและดัชนีการละลายน้ำเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในสตาร์ชข้าวทั้ง 2 พันธุ์ โดยสตาร์ชข้าวเหนียวมีกำลังการพองตัวสูงกว่าสตาร์ชข้าวเจ้า และพบว่าค่าร้อยละการละลายของข้าวเจ้าที่อุณหภูมิ ตั้งแต่ 85 องศาเซลเซียสขึ้นไปจะมีค่าสูงกว่าข้าวเหนียว

นอกจากนี้ Lii และคณะ (1996) ยังศึกษาถึงปริมาณอมัยโลสที่มีผลต่อสมบัติทางด้านการไหลของสตาร์ชข้าว โดยเติมอมัยโลสเพิ่มเข้าไปในระบบ พบว่าปริมาณอมัยโลสมีผลต่อสมบัติสมบัติด้านการไหล ในกระบวนการถ่ายเทพลังงานและมวลเมื่อมีการให้ความร้อนในขณะที่มีความชื้นอยู่ในระบบ พลังงานความร้อนจะทำลายโครงสร้างผลึกภายในเม็ดสตาร์ช สำหรับสตาร์ชข้าวเหนียวซึ่งมีปริมาณอมัยโลสต่ำมาก (0.99%) โครงสร้างผลึกจะถูกทำลายได้ง่าย เม็ดสตาร์ชสามารถดูดซับน้ำได้มาก ทำให้เกิดการพองตัวสูง ซึ่งสันนิษฐานว่าเพราะความแข็งแรงของเม็ดสาตาร์ชเป็นสัดส่วนผกผันกับกำสังการพองตัว และพบว่าความแข็งแรงของเม็ดสตาร์ชนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณอมัยโลส เมื่อน้ำแป้งมีความเข้มข้นสูง เม็ดสตาร์ชจะเกาะกันเป็นกลุ่มแน่นหนา มีกำลังการพองตัวต่ำ โครงสร้างแข็งแรง แต่พบว่าในน้ำแป้งที่มีความเข้มข้นต่ำจะมีการพองตัวสูงขึ้นและโครงสร้างอ่อนแอกว่า การเติมอมัยโลสลงในระบบทำให้ $T_{G'}$ (อุณหภูมิที่ค่า storage modulas (G') เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อตรวจสอบด้วย dynamic rheometer) เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

แต่ไม่มีผลต่อการเพิ่มค่า G' ระหว่างการให้ความร้อน พบว่าค่า G' จะเพิ่มขึ้นในช่วงการเก็บที่อุณหภูมิต่ำสำหรับสตาร์ชข้าวเหนียว หรือเมื่อมีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งอธิบายได้ว่าอมัยโลสที่เติมลงไปจะละลายออกมาพร้อมกับอมัยโลสจากเม็ดสตาร์ชข้าวในช่วงการให้ความร้อน อมัยโลสที่เติมเข้าไปในระบบไม่มีผลต่อโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชที่พองตัว แต่เมื่อเกิดการ recrystallization ของอมัยโลสในช่วงการทำให้เย็น พบว่าอมัยโลสที่เติมเข้าไปช่วยเสริมโครงสร้างของเจลให้แข็งแรงขึ้นโดยเกิด cross-linked กับเจลของสตาร์ชในช่วง aging ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าโครงสร้างและสมบัติของเม็ดสตาร์ชเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการไหล โดยสมบัติที่สำคัญที่มีผลต่อโครงสร้างของเม็ดสตาร์ช คือ อมัยโลส ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับในงานของ Lii และคณะ (1995) โดยในงานวิจัยของ Lii และคณะ ได้รายงานไว้ว่าเมื่อตรวจสอบข้าวโดยใช้ X-ray diffractometer พบว่าทั้งข้าวเจ้าและข้าวเหนียวที่ใช้ในการทดลองล้วนเป็น A-type diffraction คือ มีโครงสร้างในส่วนผลึกของอมัยโลเพคตินเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น



รูปที่ 2.13 กำลังการพองตัวและดัชนีการละลายน้ำของสตาร์ชข้าวเจ้า (KSS7) และสตาร์ชข้าวเหนียว (TCW70) (Lii et al., 1996)

จะเห็นว่างานวิจัยที่ผ่านมานี้กล่าวถึงผลของอมัยโลสที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของแป้งข้าว นอกจากอมัยโลสแล้วยังพบว่าโปรตีนก็เป็นปัจจัยอีกตัวหนึ่งที่ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพ ดังเช่น

Hamaker และ Griffin (1990; 1993) และ Hamaker และคณะ (1991) ซึ่งได้ทำการศึกษาถึงผลของโปรตีนที่มีต่อข้าวพันธุ์ต่างๆ โดยใช้ข้าวทั้งหมด 9 พันธุ์ เป็นข้าวเมล็ดสั้น 2 พันธุ์ ข้าวเมล็ดปานกลาง 3 พันธุ์ และข้าวเมล็ดยาว 4 พันธุ์ นำข้าวมาโม่แห้งให้เป็นแป้งข้าว และสกัดไขมันออก มีการนำข้าวสารและข้าวสารที่สกัดโปรตีนออกมาวิเคราะห์ค่าความเหนียว (stickness) ในขณะที่วิเคราะห์ค่าความหนืดของแป้งข้าวโดยใช้ Brabender viscoamylograph เปรียบเทียบระหว่างแป้งข้าวพันธุ์ Newbonnet ที่สกัดไขมันออกกับแป้งข้าวพันธุ์นี้ที่สกัดไขมันและโปรตีนออก และเปรียบเทียบระหว่างสตาร์ชข้าวกับสตาร์ชข้าวที่ทำการสกัดโปรตีนออก นอกจากนี้ยังวิเคราะห์ pasting proprties ของแป้งข้าวทั้ง 9 พันธุ์ที่สกัดไขมันออก กับแป้งข้าวทั้ง 9 พันธุ์นี้ที่สกัดไขมันและโปรตีนออก พบว่าเมื่อสกัดโปรตีนออกจากข้าว ความเหนียวจะเพิ่มขึ้นในข้าว 7 จาก 9 พันธุ์ โดยพบว่าข้าวเมล็ดสั้น และเมล็ดยาวปานกลางได้รับผลกระทบจากการสกัดโปรตีนมากกว่าข้าวเมล็ดยาว และพบว่า Brabender viscoamylogram ของแป้งข้าว Newbonnet ที่สกัดไขมันและโปรตีนออก ให้ค่า viscoamylogram ต่ำลงกว่าที่สกัดเฉพาะไขมันออกในทุกค่าความหนืด ในขณะที่สตาร์ชข้าวที่สกัดโปรตีนออกยังคงให้ viscoamylogram ใกล้เคียงกับสตาร์ชข้าวที่ไม่ได้ทำการสกัดโปรตีนออก และสำหรับแป้งข้าวทั้ง 9 พันธุ์พบว่าการสกัดโปรตีนออกส่งผลให้ค่า peak viscosity ลดลง ซึ่งเขาสันนิษฐานว่าเนื่องจากโปรตีนเป็นองค์ประกอบที่ทำให้แรงยึดเหนี่ยวภายในแป้งสูง ส่งผลให้เม็ดสตาร์ชจากแป้งมีความแข็งแรงสูง เมื่อขาดโปรตีน เม็ดสตาร์ชจะเปราะ (fragile) เมื่อได้รับแรงเฉือนจากเครื่อง Brabender viscoamylograph เม็ดสตาร์ชจึงถูกทำลายได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ความหนืดทุกค่าใน viscoamylogram และ peak viscosity ลดลง

ในปีต่อมา Hamaker และคณะ (1991) จึงศึกษาผลของโปรตีนที่มีต่อความเหนียวของข้าว โดยทดลองกับแป้งข้าว 32 พันธุ์ เพื่อศึกษาผลของโปรตีนชนิด 60 kDa ซึ่งเป็นโปรตีนที่มีพันธะไดซัลไฟด์เกาะเกี่ยวอยู่บริเวณขอบนอกของเม็ดสตาร์ชและฝังตัวอยู่ในเม็ดสตาร์ชที่มีต่อความเหนียวของข้าว พบว่าปริมาณของโปรตีน 60 kDa มีผลต่อความเหนียวของข้าว โดยมีค่าสหสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง เท่ากับ –0.85 คือความเหนียวของข้าวจะเพิ่มขึ้น ถ้าโปรตีนชนิด 60 kDa ถูกทำลาย เนื่องจากโปรตีนชนิดนี้ทำให้เม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรง ต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นในการทำลายเม็ดสตาร์ช ส่งผลให้สตาร์ชละลายออกมาได้น้อย ความเหนียวจึงน้อย นอกจากนี้

ยังพบว่าค่าสหสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนชนิด 60 kDa และอมัยโลส โดยมีค่าเท่ากับ 0.96 ($p<0.01$) แสดงให้เห็นว่าอมัยโลสและโปรตีนมีความสัมพันธ์ในทางบวกซึ่งกันและกัน และย่อมเป็นผลให้อมัยโลสมีความสัมพันธ์ในทางลบกับความเหนียวของข้าว เมื่อพบว่าโปรตีนชนิด 60 kDa มีผลต่อความเหนียว จึงเป็นไปได้ว่าโปรตีนชนิดนี้จะส่งผลต่อ pasting properties

ดังนั้นในปี 1993 Hamaker และ Griffin จึงรายงานถึงผลของโปรตีนที่มีต่อ pasting properties ของข้าว 9 พันธุ์ที่ใช้ในงานวิจัยที่รายงานในปี 1990 โดยพบว่าเมื่อทำการสกัดโปรตีนออกจากข้าว ทำให้ความหนืดเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยพบว่าทิศทางการเปลี่ยนแปลงนั้นขึ้นอยู่กับแรงเฉือนหรือปริมาณของแรงที่ได้รับในขณะอยู่ในกระบวนการให้ความร้อน หรือขึ้นกับเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ความหนืด โดยสรุปแล้วคือเม็ดสตาร์ชจะขาดความแข็งแรงถ้าพันธะไดซัลไฟด์ของโปรตีนที่อยู่บริเวณขอบนอกหรือภายในเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย ดังนั้นเมื่อเม็ดสตาร์ชที่พองตัว ได้รับแรงเฉือน (shear stress) ที่มาก จะทำให้เม็ดสตาร์ชถูกทำลายได้ง่าย ดังนั้นการขาดโปรตีนในโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชจะทำให้เม็ดสตาร์ชเปราะ (fragility) แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าไม่มีการให้แรงเฉือนหรือได้รับแรงเฉือนที่น้อยมาก เม็ดสตาร์ชที่ถูกทำลายโปรตีนจะสามารถพองตัวได้มาก ทำให้ความหนืดของเพสต์สูง ซึ่งสิ่งนี้สังเกตเห็นได้จากการวัดความหนืดด้วยเครื่อง brookfield หรือ Bostwick อีกสิ่งหนึ่งซึ่งสนับสนุนกับสมมติฐานที่ตั้งขึ้นนี้คือ เมื่อนำแป้งข้าวทั้งที่ยังไม่ได้สกัดโปรตีนออก กับที่สกัดโปรตีนออกไปแล้ว มาทำให้เกิดการเจลาติไนซ์แล้วควบคุมให้ได้รับแรงเฉือนเท่ากัน พบว่าแป้งข้าวที่สกัดเอาโปรตีนออก มีค่า breakdown ที่สูงมากกว่าแป้งข้าวที่ไม่ได้สกัดโปรตีนออก สิ่งนี้ชี้ให้เห็นว่าพันธะไดซัลไฟด์ของโปรตีนที่ห่อหุ้มโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชมีผลทำให้ค่า breakdown ต่ำ ช่วยให้เม็ดสตาร์ชที่พองตัวมีเสถียรภาพ

งานวิจัยที่ผ่านมาบ่งบอกถึงผลของโปรตีนที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของแป้งข้าว นอกจากโปรตีนแล้ว พบว่าไขมันก็มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของแป้งข้าวเช่นกัน ดังที่ทราบกันมานานแล้วว่าไขมันสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอมัยโลสได้ และส่งผลต่อสมบัติในด้านการเกิดเจลาติไนเซชั่นและรีโทรเกรเดชัน การมีไขมันในกระบวนการเกิดเจลาติไนเซชันจะลดปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำ และลดกำลังการพองตัวของสตาร์ช ซึ่งจะส่งผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชั่นซึ่งใช้อมัยโลสเป็นปัจจัยหลักในการเกิด ยกตัวอย่างงานวิจัยในเรื่องนี้เช่น

Hibi (1994) ซึ่งรายงานถึงผลของไขมันที่มีต่อสมบัติทางด้านความหนืดของเจลของสตาร์ชข้าว โดยใช้สตาร์ชข้าวที่มีปริมาณไขมันภายในเม็ดสตาร์ช (internal starch) น้อยกว่าร้อยละ 1 ในการทดลองทำการวิเคราะห์สมบัติด้านความหนืด กำลังการพองตัว และการละลาย โดยเปรียบเทียบสตาร์ชข้าวนี้กับสตาร์ชข้าวที่ทำการเติมไขมัน ซึ่งได้แก่ กรดไขมัน palmitic acid และสาร emulsifier 2 ชนิด คือ Tween 40 และ Span 40 ลงไปในสารละลายสตาร์ชข้าว พบว่าทั้งไขมันที่มีในสตาร์ชข้าว และไขมันที่เติมลงไปในสตาร์ชข้าวล้วนมีผลต่อสมบัติทางกายภาพทั้งสิ้น โดยพบว่าค่าการละลายและกำลังการพองตัว รวมทั้งการเกิดเจลาติไนซ์ในสตาร์ชข้าวที่สกัดไขมันออกจะมีค่าสูงกว่าในสตาร์ชที่มีไขมัน หรือเติมไขมันลงไป นอกจากนี้ยังพบว่าถ้าไขมันที่เติมลงไปเป็น hydrophilic emulsifier (Tween 40) จะทำให้เจลของสตาร์ชที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากกว่าเจลของสตาร์ชที่ได้จาก hydrophobic emulsifier (Span 40) เนื่องจากสามารถอุ้มน้ำได้ดีกว่า

Tester และ Morrison (1990a) รายงานถึงความสัมพันธ์ระหว่างอมัยโลเพคติน อมัยโลส และไขมันที่มีต่อกำลังการพองตัวและร้อยละการละลาย พบว่าสำหรับสตาร์ชธัญชาตินั้น อมัยโลสมีความสัมพันธ์ในทางบวกกับไขมัน จึงเป็นเรื่องยากที่จะอธิบายถึงผลที่มีต่อการพองตัวและการเกิดเจลาติไนเซชันอย่างชัดเจน เพียงพบว่าการพองตัวของสตาร์ชมีความเกี่ยวข้องกับการสูญเสียการจัดระเบียบภายในโครงสร้างผลึกของอมัยโลเพคติน ตามปกติอมัยโลเพคตินจะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่รวมกันเป็นกลุ่มหรือ cluster อย่างแน่นหนา ซึ่งกลุ่มหรือ cluster ของเกลียวคู่อมัยโลเพคตินนั้นจะแยกออกจากกัน เมื่อได้รับความร้อนที่ทำให้ birefringence หายไปหมด และเมื่อให้ความร้อนในอุณหภูมิที่สูงขึ้นเกลียวคู่ของอมัยโลเพคตินจึงจะแยกตัวออกจากกัน และสตาร์ชบางส่วนจะละลายออกมาเมื่อเม็ดสตาร์ชเกิดเจลาติไนซ์ พอลิเมอร์ที่ละลายออกมาจะแตกต่างกันขึ้นกับประเภทของพืชนั้นๆ พบว่าอมัยโลสสายตรงที่มีมวลโมเลกุลต่ำจะละลายออกมาได้ง่ายที่สุดหรือที่อุณหภูมิต่ำที่สุด จากนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อมัยโลสที่มีกิ่งก้านซึ่งมีมวลโมเลกุลสูงจะละลายออกมา ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะพบในมันฝรั่ง บาร์เล่ ข้าวโพดข้าวเหนียว ถั่ว และข้าวสาลี แต่ในข้าวโอ้ตนั้นอมัยโลสและอมัยโลเพคตินจะละลายออกมาด้วยกันในทุกอุณหภูมิ ส่วนในกรณีของ waxy starch พบว่าเกือบทั้งหมดที่ละลายออกมา คือ อมัยโลเพคติน สำหรับในข้าว Priestley (1976) รายงานว่าอมัยโลสที่ละลายน้ำได้ (soluble amylose) จะละลายออกมาเพียงร้อยละ 1-8 ในขณะที่อมัยโลเพคตินที่ละลายน้ำได้ (soluble amylopectin) จะละลายออกมามากถึงร้อยละ 14-72 แต่ในการเกิดรีโทรเกรเดชัน อมัยโลสสามารถเกิดโครงสร้างใหม่ (recrystallization) ได้เร็วกว่าอมัยโลเพคติน ดังนั้นสำหรับการเกิดรีโทรเกรเดชัน ปัจจัยหลักที่มีผล คือ อมัยโลส (Orford

et al., 1987) เนื่องจากไม่สามารถตรวจสอบไขมันที่ละลายออกมากับสตาร์ชได้ เพราะไขมันที่เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับอมัยโลสและไม่ละลายในน้ำ พบว่าเกลียวอมัยโลสกับไขมันจะไม่ถูกทำลายถ้าไม่ใช้ความร้อนสูงกว่า 94–98 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามสารประกอบเชิงซ้อนของอมัยโลสและไขมันจะทำให้การพองตัวเกิดได้อย่างจำกัด และทำให้อมัยโลสละลายออกมาน้อย พบว่าในสตาร์ชที่มีไขมันมาก จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอมัยโลสร้อยละ 7-8 (ในกรณีที่สตาร์ชมีอมัยโลสทั้งหมดร้อยละ 29) นั่นคือปริมาณอมัยโลสสูงสุดที่จะละลายออกมาได้ คือประมาณร้อยละ 20 จะเห็นว่าการจะใช้ปริมาณของสารประกอบระหว่างอมัยโลสกับไขมันมาบ่งชี้ถึงกำลังการพองตัวและการละลายเป็นเรื่องยาก ดังนั้นจึงทำการศึกษาสมบัติของอมัยโลเพคตินจากสตาร์ชที่มีปริมาณอมัยโลเพคตินอยู่เกือบทั้งหมด พบว่าในสตาร์ชที่มีอมัยโลเพคตินเป็นองค์ประกอบเกือบทั้งหมด กำลังการพองตัวจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่าในสตาร์ชที่มีปริมาณอมัยโลส และในการศึกษาถึงผลของไขมันที่มีต่อการพองตัวของสตาร์ช โดยสกัดไขมันออกจากสตาร์ชที่ทำการทดลอง พบว่าในสตาร์ชที่ทำการสกัดไขมันออกจะมีค่าการพองตัวสูงกว่าที่ไม่ได้สกัดไขมัน ดังนั้นงานวิจัยของเขาจึงแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและการละลาย คือ อมัยโลส อมัยโลเพคติน และไขมัน

นอกจากนี้ Tester และ Morrison (1990b) ได้ศึกษาการเกิดการพองตัวและการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชข้าวซึ่งมีอมัยโลเพคตินในองค์ประกอบทั้งหมด พบว่าสตาร์ชข้าวมี gelatinized temperature 3 ช่วงด้วยกัน คือ ช่วงต่ำ (64-67 องศาเซลเซียส) ปานกลาง (68-74 องศาเซลเซียส) และสูง (75-79 องศาเซลเซียส) ในขณะที่ swelling factor ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ของสตาร์ชที่มี gelatinized temperature ในช่วงต่ำ ปานกลาง และสูง จะเท่ากับ 24-42, 28-42 และ 29-40 ตามลำดับ และพบว่าการพองตัวของแป้งข้าวที่มี gelatinized temperature ต่ำสามารถเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่าแป้งที่มี gelatinized temperature สูง เมื่อตรวจสอบโครงสร้างของอมัยโลเพคตินในสตาร์ชข้าวเหนียวที่มี gelatinized temperature ต่ำเทียบกับสตาร์ชข้าวเหนียวที่มี gelatinized temperature สูง พบว่าโครงสร้างโมเลกุลของอมัยโลเพคตินใกล้เคียงกัน ด้วยเหตุนี้จึงสรุปว่าสตาร์ชข้าวเหนียวที่มี gelatinized temperature ต่ำ มีความเป็นผลึกและความสมบูรณ์ของผลึกน้อยกว่าสตาร์ชที่มี gelatinized temperature สูง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าโครงสร้างผลึกของอมัยโลเพคติน รวมไปถึงมวลโมเลกุล และรูปร่างของอมัยโลเพคติน เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการพองตัวและการเจลาติไนเซชันของสตาร์ช

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะพบว่าสมบัติทางเคมีและกายภาพนั้นมีความสำคัญต่อการตรวจสอบคุณสมบัติของแป้งหรือเมล็ดข้าวอยู่มาก โดยพบว่าสมบัติทางเคมีและกายภาพจะเป็นตัวบ่งบอกถึงสมบัติในด้านต่างๆของข้าวและแป้งข้าวที่เกี่ยวกับการนำไปใช้ เป็นต้นว่า บ่งบอกถึงคุณภาพในการหุง (cooking quality) ซึ่งหมายถึงลักษณะปรากฏของเมล็ดข้าว ภายหลังจากผ่านการหุง เนื่องจากเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาคุณภาพการหุงแตกต่างกันไปตามบริโภคนิสัยในการรับประทานของผู้คนในท้องถิ่นนั้นๆ เช่น คนญี่ปุ่นและเกาหลีรับประทานข้าวที่นุ่มเหนียวจับกันเป็นก้อน ชาวอินเดียนิยมข้าวแข็งร่วน ส่วนชาวไทยนิยมข้าวหอมนุ่ม เมล็ดไม่เกาะกันและเมื่อทิ้งไว้ให้เย็นก็ยังไม่แข็ง ซึ่งคุณภาพการหุงเหล่านี้จะแตกต่างไปในข้าวแต่ละพันธุ์ (งามชื่น, 2540ก) นอกจากนี้ยังมีการนำข้าวไปใช้ในรูปแบบอื่นอีกมาก ได้แก่ การแปรรูปผลิตภัณฑ์จากข้าวเป็นแป้งข้าว ซึ่งพบว่าในปัจจุบันนิยมใช้ข้าวประเภทอมัยโลสสูงมาผลิต เช่น ข้าวพันธุ์เหลืองประทิว 123 สุพรรณบุรี 1 สุพรรณบุรี 90 และพันธุ์ชัยนาท 1 เป็นต้น การแปรรูปข้าวและแป้งข้าวเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเส้นและแผ่น เช่น ก๋วยเตี๋ยวชนิดต่างๆ ขนมจีน ก๋วยจั๊บ ลอดช่องแป้งแผ่นหรือใบเมี่ยงญวน เป็นต้น การแปรรูปข้าวและแป้งข้าวมาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวหรืออาหารว่าง (snack food) เช่น ในการผลิตข้าวเกรียบว่าว ประเทศญี่ปุ่นมีการนำเข้าข้าวจากประเทศไทย คือ ข้าวเหนียวพันธุ์ กข6 เพื่อนำไปทำขนมอะราเร่ (arare) หรือนำข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 กข 15 และ กข 21 เพื่อนำมาผลิตขนมเซมเบ้ (sembei) นอกจากนี้ยังมีการนำข้าวกล้องไปผลิตเป็นข้าวกล้องอบกรอบหรือไรส์เค้กไว้รับประทานกับนมเป็นอาหารเช้าจากธัญชาติ นอกจากนี้ยังมีการนำข้าวและแป้งข้าวมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ข้าวกึ่งสำเร็จรูป เช่น โจ๊ก 7 นาที โจ๊กกึ่งสำเร็จรูป ข้าวต้มกึ่งสำเร็จรูป เป็นต้น การแปรรูปข้าวและแป้งข้าวเป็นเครื่องดื่มอัลกอฮอล์ ซึ่งในประเทศไทยนิยมใช้ข้าวเหนียวในการผลิตเหล้า เช่น เหล้าขาว เหล้าสาโท พบว่าในประเทศญี่ปุ่นนิยมผลิตเหล้าสาเกจากข้าวเจ้าอมัยโลสต่ำ หรือใช้ข้าวทุกประเภทในการผลิตเหล้าโชชุ นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวสามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำส้มสายชูหมักได้ ยังมีการนำข้าวและแป้งข้าวไปใช้ในผลิตภัณฑ์อีกหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นในอาหารเด็กอ่อน ฟิล์มที่ใช้ในการห่ออาหารที่สามารถรับประทานได้ กาว แป้งดัดแปร รวมทั้งในผลิตภัณฑ์น้ำเชื่อม (syrup) (งามชื่น, 2540ข; วราทัศน์, 2539) จะเห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากข้าวมีหลากหลายมาก ดังนั้นในการเลือกข้าวหรือแป้งข้าวเพื่อนำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆนั้น ควรต้องคำนึงถึงสมบัติที่ต้องการจากข้าวเป็นสำคัญ เนื่องจากข้าวมีพันธุ์อยู่หลากหลาย ดังนั้นการทดลองหาพันธุ์หรือสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของข้าวที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์จากข้าวและแป้งข้าวชนิดต่างๆ จึงเป็นข้อควรกระทำ เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศผู้ส่งออกข้าวรายใหญ่ ดังนั้นจึงควรอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาถึงข้อมูลด้านสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของแป้งข้าวแต่ละพันธุ์

I 1911 2 3 8 X

และด้วยเหตุที่ยังไม่มีการรายงานถึงสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของข้าวหรือพันธุ์ข้าวที่เหมาะสมในการนำมาผลิตผลิตภัณฑ์จากน้ำเชื่อม ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องการวิจัยเพื่อหาพันธุ์ข้าวที่มีสมบัติทางเคมีและกายภาพเหมาะสม ในการนำมาผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทน้ำเชื่อมชนิดหนึ่ง ซึ่งก็คือ มอลโทเดกซ์ทริน

2.6 **มอลโทเดกซ์ทริน** (Maltodextrin)

2.6.1 **ความหมายและลักษณะทั่วไป**

มอลโทเดกซ์ทริน คือ ผลิตภัณฑ์แป้งดัดแปรชนิดหนึ่ง มีสมบัติกึ่งกลางระหว่างสตาร์ชและน้ำเชื่อม ได้จากปฏิกิริยาย่อยสลายสตาร์ชด้วยกรดและ/หรือเอนไซม์ α-amylase มีค่าสมมูลเดกซ์โทรส (Dextrose Equivalent, DE) น้อยกว่า 20 (Verwaerde and Sicard, 1984; Schenck, 1996) ประกอบด้วยโมเลกุลที่เหลือจากการย่อยอมัยโลส และอมัยโลเพคติน มีขนาดโมเลกุลในช่วง oligomer จนถึง macromolecule ของน้ำตาล D-glucose มอลโทเดกซ์ทรินมีทั้งชนิดเหลวลักษณะคล้ายน้ำเชื่อม และชนิดผง ลักษณะเป็นผงสีขาวคล้ายแป้ง สามารถละลายน้ำได้ และไม่มีรสหวาน

ผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินมีค่า DE แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับระดับการย่อย นิยมใช้ค่า DE ในการจำแนกชนิดของมอลโทเดกซ์ทริน มีการพยายามแบ่งชนิดของมอลโทเดกซ์ทรินออกเป็นกลุ่มต่างๆ โดย Van Beynum และ Roels (1985) ได้แบ่งชนิดของมอลโทเดกซ์ทรินออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกจะมีค่า DE 10-14 นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารเหลว เพื่อให้เนื้อสัมผัสแก่ผลิตภัณฑ์ กลุ่มหลังจะมีค่า DE 15-19 ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง โดยใช้เป็นสารเพิ่มปริมาตรในผลิตภัณฑ์ที่ต้องมีการทำแห้งแบบพ่น (spray dry) นอกจากนี้ยังใช้เคลือบผิวลูกกวาดเพื่อป้องกันและลดการดูดความชื้น Kenedy และคณะ (1985) แบ่งชนิดของมอลโทเดกซ์ทรินออกเป็น 4 ชนิดตามประเภทที่มีจำหน่ายทางการค้า โดยชนิดที่ 1 คือ DE 5-8 ชนิดที่ 2 มี DE ในช่วง 11-14 ชนิดที่ 3 มี DE อยู่ในช่วง 15-18 และชนิดที่ 4 มี DE ในช่วง 18-20 นอกจากนี้ Pszczola (1991) มีการนำผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้าโดยใช้เอนไซม์ α-amylase มาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น ไอศกรีม ไส้กรอก น้ำสลัด และไส้กรอก เป็นต้น ซึ่งเป็นการนำมอลโทเดกซ์ทรินมาใช้เพื่อลดปริมาณการใช้ไขมันในผลิตภัณฑ์ Pszczola แบ่งมอลโทเดกซ์ทรินเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มี DE น้อยกว่าหรือเท่ากับ 3 มีลักษณะเป็นผงสีขาว ละลายได้ในน้ำเย็น ที่ความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 20 ให้เจลที่มีลักษณะคล้ายไขมัน กลุ่มที่สองจะมี DE เท่ากับ 10

และ 18 มีลักษณะเป็นผงสีขาว ละลายน้ำง่ายแต่ไม่เกิดเป็นเจล นำมาใช้ทดแทนไขมันในสูตร ทำให้เกิดเนื้อสัมผัสที่แน่นและทำให้อาหารมีลักษณะที่ดูชุ่มน้ำ

ดังนั้นผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินมีหลากหลายในตัวของมันเอง เนื่องจากมีค่า DE ในช่วงกว้าง มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE ต่างกันจะให้สมบัติทางเคมีและกายภาพต่างกันด้วย ซึ่งในการเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ชนิดนี้จึงต้องพิจารณาถึงสมบัติของผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการว่าต้องการในด้านใด ความหนืด ความหวาน การใช้ทดแทนไขมัน หรือสมบัติในด้านการป้องกัน browning เป็นต้น แล้วจึงพิจารณาเลือกใช้ผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินในช่วงที่มีค่า DE ที่ให้สมบัติที่ต้องการ ปัจจุบันประเทศไทยนำเข้ามอลโทเดกซ์ทรินจากต่างประเทศ เนื่องจากโรงงานในประเทศส่วนใหญ่จะผลิตน้ำเชื่อม กลูโคสไซรัป และฟรักโตสไซรัป สาเหตุที่ไม่ทำการผลิตมอลโทเดกซ์ทริน เนื่องจากการผลิตมอลโทเดกซ์ทรินทำให้เกิดปัญหาเรื่องสารละลายแป้งติดค้างภายในท่อหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต เนื่องจากมอลโทเดกซ์ทรินเป็นผลิตภัณฑ์ที่ถูกย่อยไปน้อย ยังคงมีความหนืดสูงอยู่ มอลโทเดกซ์ทรินที่พบว่าเคยมีการผลิตภายในประเทศ ผลิตในรูปผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินเหลวจากแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งมีค่า DE ประมาณ 15-20 และมีการนำไปเป็นส่วนผสมในการผลิตครีมเทียม มอลโทเดกซ์ทรินซึ่งจำหน่ายทางการค้าบางชนิดในปัจจุบันนี้ แสดงดังตารางที่ 2.4 ซึ่งรวบรวมมาจาก Setser and Racette (1992) และ Alexander (1994)

นอกจากใช้ค่า DE ในการจำแนกประเภทของมอลโทเดกซ์ทรินแล้ว พบว่ามีการใช้ปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่มีค่า Degree of polymerization (DP)ต่ำ ชนิดต่างๆ ในการจำแนกประเภทของมอลโทเดกซ์ทริน เนื่องจากสมบัติทางเคมีกายภาพของมอลโทเดกซ์ทรินขึ้นกับสัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตชนิดต่างๆด้วยเช่นกัน โดยทั่วไปเมื่อค่า DE ของมอลโทเดกซ์ทรินสูงขึ้น สัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตที่มีค่า DP ต่ำๆ จะสูงขึ้นเช่นกัน ทำให้การละลายของมอลโทเดกซ์ทรินดีขึ้น (Brook and Griffin, 1987a)

ในเอกสารของบริษัท ABBRA ซึ่งจำหน่ายผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินทางการค้า Maldex 100 เสนอวิธีคำนวณค่า DE โดยใช้ปริมาณของน้ำตาลที่มี DP ต่ำๆ ซึ่งวิเคราะห์ได้โดยการใช้ Liquid chromatography สูตรที่ใช้ในการคำนวณ คือ

$$DE = (\%DP1)(1.00)+ (\%DP2)(0.581)+ (\%DP3)(0.395)+ (\%DP4)(0.298)+ (\%DP5)(0.242)+ (\%DP6)(0.208)+ (\%DP7)(0.157)+ (\%DP8)(0.136)+ (\%DP9)(0.126)+ (\%DP10)(0.109)+ (\%DP11)(0.096)+ (\%DP12)(0.084)$$

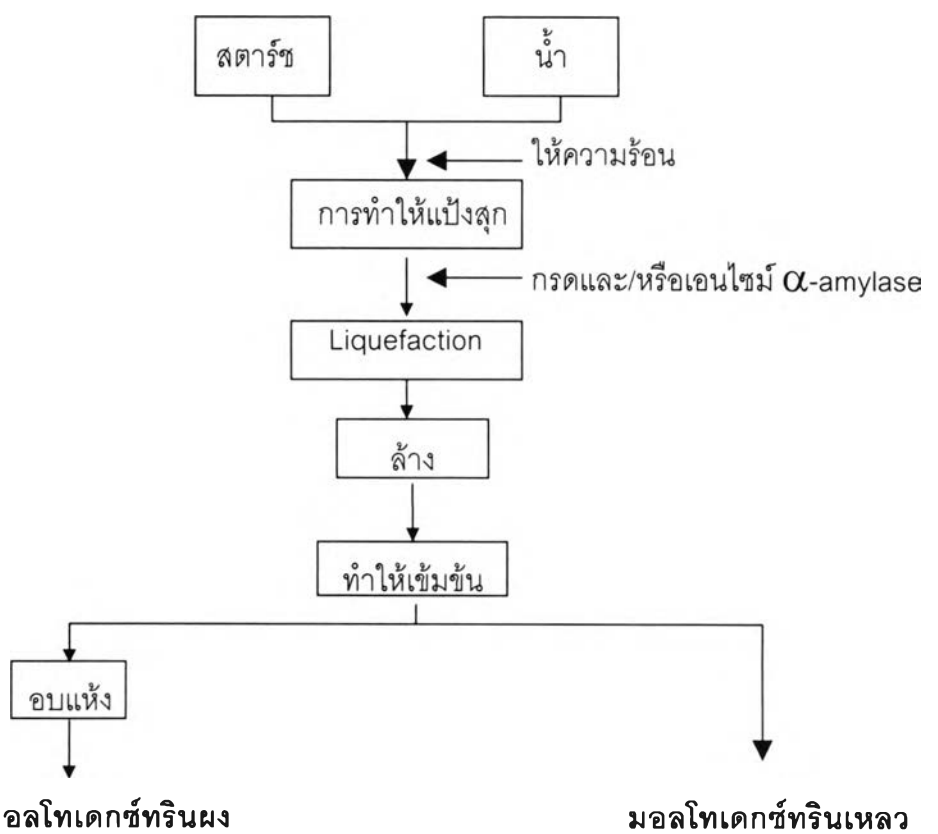
ตารางที่ 2.4 มอลโทเดกซ์ทรินทางการค้าบางชนิด (รวบรวมจาก Setser and Racette (1992) และ Alexander (1994))

	บริษัทที่จำหน่าย	DE	วิธีการใช้	จุดเด่น
มอลโทเดกซ์ทรินจากข้าวโพด	Roquette	< 5	ละลายในน้ำเย็น	ผลิตโดยใช้การย่อยด้วยเอนไซม์ α-amylase ไม่เกิดเจล เหมาะกับการใช้ในผลิตภัณฑ์ซอส
	Grain Processing	5 10 15	ละลายในน้ำเย็น	สามารถเลือกใช้ได้กับผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิดโดยเลือกจาก DE ที่เหมาะสม
มอลโทเดกซ์ทรินจากมันฝรั่ง	Avebe America	3	ละลายในน้ำอุ่น	ผลิตโดยใช้การย่อยด้วยเอนไซม์ α-amylase
	Roquette	< 5	ละลายในน้ำเย็น	ผลิตโดยใช้การย่อยด้วยเอนไซม์ α-amylase ใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการการเกิดเจล เช่น ผลิตภัณฑ์ขนมอบ ของหวานแช่เย็น
มอลโทเดกซ์ทรินจากมันสำปะหลัง	National Starch and Chemical	4	ละลายในน้ำเย็น	สามารถใช้ในกระบวนการการ HTST (High temperature and short time) และเสถียรเมื่อเก็บผลิตภัณฑ์ไว้ที่อุณหภูมิต่ำ
มอลโทเดกซ์ทรินจากข้าว	Zumbro/ IFP	3	ละลายในน้ำเย็น	ผลิตโดยการย่อยด้วยเอนไซม์ α-amylase ใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมหวาน แช่เย็น ขนมอบ น้ำสลัด

2.6.2 การผลิตมอลโทเดกซ์ทริน

สตาร์ชเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตมอลโทเดกซ์ทริน นอกจากการใช้สตาร์ช แล้วยังพบว่ามีการใช้อนุพันธ์ของสตาร์ช (starch derivatives) ซึ่งรวมถึงแป้งดัดแปร (modified starch) เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในการผลิตมอลโทเดกซ์ทรินด้วย (Harjes and Wermers, 1976; Horn and Kimball, 1976) การเตรียมวัตถุดิบนิยมเตรียมในรูปน้ำแป้ง นอกจากนี้ยังมีการผลิตมอลโทเดกซ์ทรินจากสตาร์ช โดยใช้กระบวนการเอกซ์ทรูชั่น (Lee and Kim, 1990; Linko et al., 1984)

กระบวนการผลิตมอลโทเดกซ์ทริน ประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญ คือ การทำให้แป้งสุก(gelatinization) และการทำให้ความหนืดลดลง (liquefaction) (Pomeranz and Shellenberger, 1962; Slott and Madsen, 1975; Brooks and Griffin, 1987a) ขั้นตอนที่กล่าวมาทั้ง 2 ขั้นตอนนั้น ถือเป็นขั้นตอนหลักในการผลิตมอลโทเดกซ์ทรินจากสตาร์ช โดยขั้นตอนการผลิตโดยทั่วไป แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ขั้นตอนการผลิตมอลโทเดกซ์ทริน

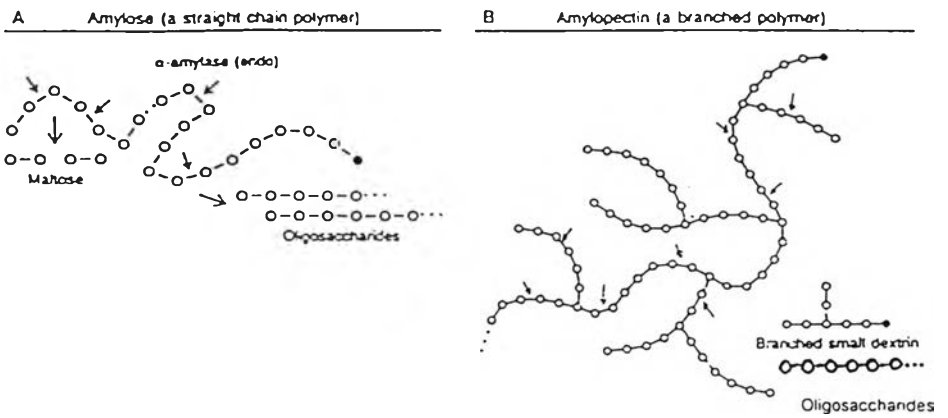
กระบวนการเจลาติไนเซชันเป็นขั้นตอนการเตรียมน้ำแป้ง โดยให้ความร้อนแก่น้ำแป้งที่อุณหภูมิสูงกว่า gelatinized temperature ของแป้งนั้นๆ ทำให้พันธะไฮโดรเจนซึ่งยึดโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชไว้ถูกทำลาย เมื่อแรงยึดเหนี่ยวภายในถูกทำลาย เม็ดสตาร์ชจะพองตัว อมัยโลสที่อยู่ภายในจะละลายออกมา เมื่อเม็ดสตาร์ชพองตัวจนถึงขั้นแตกออก อมัยโลสและอมัยโลเพคตินจะละลายออกมาได้มาก ในขั้นนี้นอกจากเม็ดสตาร์ชจะแตกตัวออกแล้ว พบว่าโปรตีนที่อยู่ภายในแป้งจะถูกทำให้เสียสภาพและตกตะกอน ในกรณีที่ใช้การย่อยด้วยเอนไซม์ α-amylase ขั้นตอนนี้จะสำคัญมาก เนื่องจากเอนไซม์จะไม่สามารถย่อยเม็ดสตาร์ชที่ยังไม่เกิดการเจลาติไนซ์หรือยังไม่เสียสภาพได้ (Kennedy, 1987)

กระบวนการ liquefaction เกิดขึ้นภายหลังจากน้ำแป้งถูกเจลาติไนซ์แล้ว โดยจะแปรสภาพให้น้ำแป้งสุกมีความหนืดลดลง โดยการใช้กรดและ/หรือเอนไซม์ α-amylase

ในการใช้กรดนั้น กรดที่นิยมใช้คือกรดไฮโดรคลอริก โดยเตรียมกรดเจือจางร้อยละ 0.12-0.15 เพื่อปรับให้น้ำแป้งความเข้มข้นร้อยละ 30-40 โดยน้ำหนักแห้ง มี pH เท่ากับ 2 และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140-160 องศาเซลเซียส ประมาณ 15–20 นาทีควบคู่ไปด้วย จากนั้นจึงสะเทินกรดด้วยโซดาแอช (Na_2CO_3) ปรับ pH ของผลิตภัณฑ์ให้ถึงประมาณ 4-5.5 (Thompson et al., 1954; Palmer, 1970) การใช้กรดเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวก แต่มีข้อจำกัด คือ ต้องใช้อุปกรณ์ที่ทนการกัดกร่อนจากกรดซึ่งมีราคาแพง สิ้นเปลืองพลังงานในการผลิตเนื่องจากต้องใช้ความร้อนสูงในกระบวนการ นอกจากนี้ยังอาจเกิด 'reversion' ของน้ำตาล กล่าวคือ การรวมตัวของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเป็นน้ำตาล disaccharide บางชนิด เช่น β-maltose β-isomaltose (Thompson et al., 1954) หรือเกิดการทำปฏิกิริยากับโปรตีน ก่อให้เกิดสีน้ำตาลและรสขมในผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้กรดย่อยสตาร์ช จะให้สัดส่วนน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ไม่สม่ำเสมอ รวมทั้งมีแนวโน้มที่จะเกิดการตกตะกอนหรือความขุ่นสูงกว่าการใช้เอนไซม์ α-amylase ที่เป็นเช่นนี้เพราะกรดจะตัดพันธะทั้ง α-1,4 และ α-1,6 glucosidic ทำให้ผลิตภัณฑ์ถูกย่อยได้มาก จึงมีคาร์โบไฮเดรตส่วนที่เป็นสายตรงมวลโมเลกุลสูงมาก ดังนั้นแนวโน้มในการเกิด retrogradation ของผลิตภัณฑ์จะสูง จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นจึงมีการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่ได้โดยการนำเอนไซม์มาใช้

เอนไซม์ที่ใช้ในการผลิตมอลโทเดกซ์ทริน คือ เอนไซม์ α-amylase มีชื่อตามระบบว่า α-1,4-glucan-4-glucanohydrolase, EC 3.2.1.1 พบในคน พืช สัตว์ และจุลินทรีย์

มีลักษณะสำคัญ คือ ย่อยสลายพันธะ α-1,4-glucosidic ภายในโมเลกุลสตาร์ช โดยตัดภายในสายพอลิเมอร์แบบสุ่ม (endo-spiltting) แสดงดังรูปที่ 2.15 (Tegge, 1984)



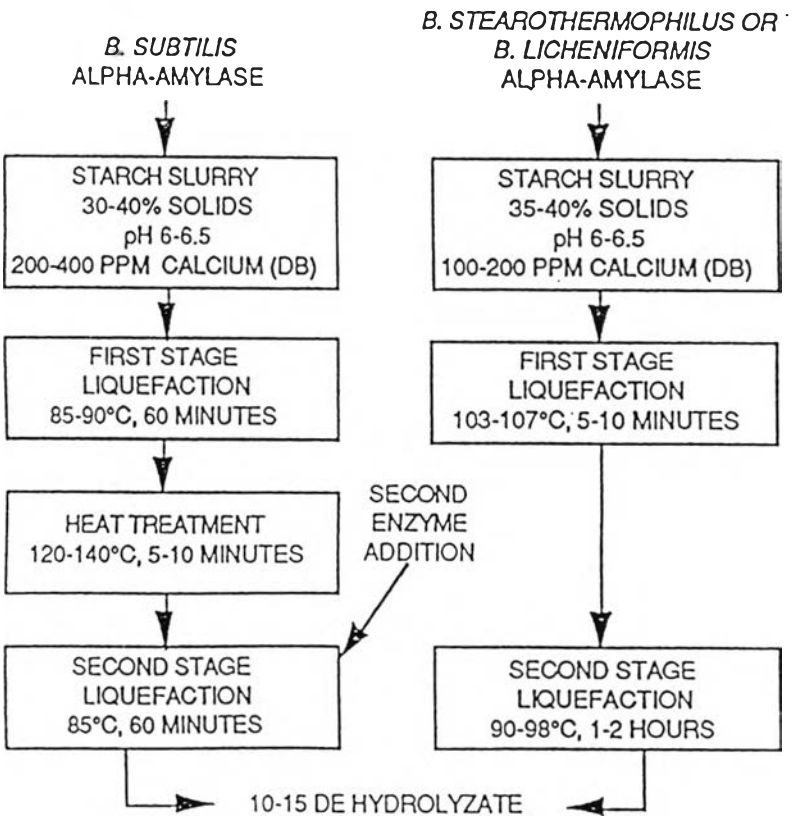
รูปที่ 2.15 การตัดพันธะของเอนไซม์ α-amylase ในสตาร์ช

การนำเอนไซม์ α-amylase มาใช้ในขั้นตอนการทำให้ความหนืดลดลง เริ่มตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 เมื่อมีการนำเอนไซม์ α-amylase ที่ผลิตจากแบคทีเรีย *Bacillus subtilis var. amyloliquefaciens* มาใช้ โดยเอนไซม์ชนิดนี้เหมาะกับการใช้ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ทนความร้อนได้มากที่สุดที่อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส สภาวะที่ต้องการคือ pH ประมาณ 6 และต้องมีอิออนของแคลเซียม 150-200 ส่วนในล้านส่วน (ppm) (Norman, 1981; Hebeda and Teague, 1994)

การนำเอนไซม์ α-amylase มาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทน้ำเชื่อม มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง มีการค้นหาและปรับปรุงสมบัติของ α-amylase เพื่อให้เหมาะสมกับสภาวะการผลิตในอุตสาหกรรม (Hebeda and Teague, 1994)

สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกใช้เอนไซม์ α-amylase ที่ผลิตจากแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* มีชื่อทางการค้าว่า Termamyl 120L® ทนความร้อนได้มาก เหมาะกับการใช้ที่อุณหภูมิ 92 องศาเซลเซียส และสามารถทนอุณหภูมิสูงถึง 110 องศาเซลเซียสได้ เนื่องจากเอนไซม์ชนิดนี้มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ประมาณ 50,000 และมีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบในโมเลกุล 2 โมล ทำให้มีความคงทนต่อความร้อนได้สูงแม้ไม่เติมแคลเซียมในระบบเลยก็ตาม (Norman, 1981; Reilly, 1985)

การใช้เอนไซม์ α-amylase ในการผลิตมอลโทเดกซ์ทริน มีวิธีการผลิตและสภาวะที่แตกต่างกันไป แต่ขั้นตอนหลักที่ใช้ในการผลิตจะมี 2 แบบเท่านั้น คือ การเติมเอนไซม์ α-amylase เพียงครั้งเดียวในถังบ่ม จึงจะเรียกวิธีนี้ว่าการใช้เอนไซม์แบบขั้นตอนเดียว (Single stage enzyme process) (Richter et al., 1976a; 1976b; Lenchin et al., 1985; Griffin and Brooks, 1989; McPherson and Seib, 1997) และการเติมเอนไซม์ α-amylase เข้าไปในถังบ่ม 2 ครั้ง เรียกวิธีนี้ว่า การใช้เอนไซม์แบบ 2 ขั้นตอน (Two-stage enzyme process) (Armbruster et al., 1971; Armbruster, 1974; Fullbrook,1984) ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเป็นการใช้เอนไซม์แบบขั้นตอนเดียว นั่นคือเติมเอนไซม์เข้าสู่ระบบในครั้งแรกเท่านั้น



รูปที่ 2.16 กระบวนการลดความหนืดของสตาร์ช ซึ่งมีทั้งการใช้เอนไซม์แบบขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอน (Hebeda and Teague, 1994)

การใช้เอนไซม์สามารถลดข้อเสียของการใช้กรด เนื่องจากใช้ภาวะไม่รุนแรงเท่าการใช้กรด ไม่เกิดผลพลอยได้ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ และยังลดการตกตะกอนหรือความขุ่น เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีทั้งคาร์โบไฮเดรตส่วนที่เป็นสายตรง (α-1,4 glucosidic bond) และส่วนที่เป็นกิ่งก้าน

(α-1,6 glucosidic bond) ทำให้น้ำเชื่อมที่ได้มีความเสถียร ไม่เกิดความขุ่น นอกจากนี้ยังให้สัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตภายในผลิตภัณฑ์ค่อนข้างสม่ำเสมอ โดย Robyt และ French (1963) Birch และ Blakebrough (1981) Griffin และ Brooks (1989) รวมทั้ง McPherson and Seib (1997) พบว่าการย่อยสลายน้ำแป้งสุกด้วยเอนไซม์ α-amylase ที่ผลิตจากแบคทีเรีย *B. licheniformis* จะให้ผลิตภัณฑ์น้ำตาลโมเลกุลต่ำ คือ มอลโทไตรโอส (DP3) มอลโทเฮกซะโอส (DP6) และมอลโทเฮปตะโอส (DP7) ในปริมาณสูง

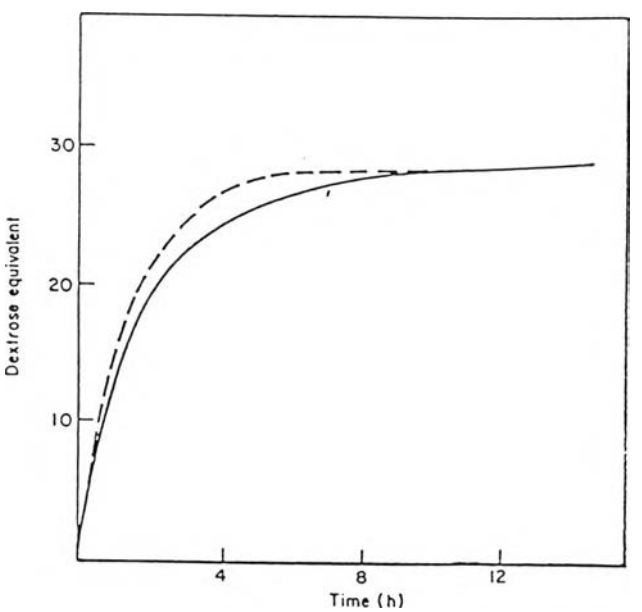
นอกจากการใช้กรด และการใช้เอนไซม์แล้ว ยังมีการผลิตที่ใช้กรดร่วมกับเอนไซม์ ซึ่งขั้นตอนการผลิตคล้ายกับการใช้เอนไซม์แบบ 2 ขั้นตอน ต่างกันเพียงในช่วงแรกของการ liquefaction จะใช้กรดในการตัดพันธะ แล้วจึงค่อยเติมเอนไซม์เข้าไปในช่วงที่สองของการย่อย จุดประสงค์ของวิธีนี้เนื่องจากเอนไซม์มีราคาแพง จึงใช้กรด HCl ซึ่งราคาถูกมาช่วยในการลดต้นทุนการผลิต การใช้กรดตัดพันธะทำให้ความหนืดของน้ำแป้งสุกลดลงอย่างรวดเร็ว ต่อมาจึงใช้เอนไซม์ α-amylase ในการตัดพันธะ ซึ่งการใช้เอนไซม์นี้เป็นการลดข้อเสียของการใช้กรดเพียงอย่างเดียวในการผลิต ผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่ได้จากวิธีนี้จึงมีคุณภาพดีกว่าการใช้กรดเพียงอย่างเดียว แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตไม่สม่ำเสมอเท่าการใช้เอนไซม์ α-amylase เพียงอย่างเดียว

ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการ liquefaction คือ starch hydrolyzates ที่มีค่า DE แตกต่างกันไป ขึ้นกับระดับในการย่อย ในการผลิตเมื่อได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่า DE ตามต้องการแล้ว ต้องสะเทินกรดด้วย Na_2CO_3 หรือยับยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์โดยการใช้ความร้อนสูง จากนั้นจึงนำ starch hydrolyzates ที่ได้มาผ่านขั้นตอนล้างหรือการทำให้ใส (Refining or Clarification) ซึ่งจะมีการแยกตะกอนโปรตีนและไขมันออกจากผลิตภัณฑ์ แล้วทำให้ใสด้วยการกรองหรือการเหวี่ยงแยก ในกรณีที่ผลิตภัณฑ์เกิด browning จะฟอกสีด้วย activated carbon นอกจากนี้ยังมีการแยกเกลือและสารอนินทรีย์ เช่น NaCl ซึ่งมาจากการสะเทินกรดด้วย Na_2CO_3 โดยการใช้ ion exchanger พบว่าการใช้เทคนิค microfiltration จะสามารถแยกตะกอนโปรตีนไขมัน สี เกลือและสารอนินทรีย์ได้เช่นกัน (Singh and Cheryan, 1997)

ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านขั้นตอนการล้างหรือการทำให้ใส จะมีลักษณะเป็นสารละลายใส แต่ยังมีความเข้มข้นต่ำ ต้องนำไประเหยน้ำ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีความเข้มข้นร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก (Dziedzic and Kearsley, 1984) ซึ่งเป็นข้อกำหนดทางการค้า เนื่องจากการใช้ความร้อน

สามารถทำลายพันธะของสตาร์ชได้ มีผลทำให้ค่า DE เปลี่ยนแปลง ดังนั้นในการทำให้เข้มข้น จึงนิยมใช้วิธีอบในตู้อบสุญญากาศ (vacuum oven) หรือเครื่องระเหยสุญญากาศ (evaporator) เพื่อระเหยน้ำในผลิตภัณฑ์โดยใช้ความร้อนต่ำ ทำให้ค่า DE ไม่เปลี่ยนแปลง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ ผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินเหลว ซึ่งสามารถนำไปทำแห้งโดยการใช้ spray dryer, drum dryer หรือโดยการทำแห้งวิธีอื่น ได้เป็นผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินชนิดผง

Yankov และคณะ (1986) ซึ่งศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมและกลไกการเกิดการย่อยสลายสตาร์ชโดยเอนไซม์ α-amylase ที่ผลิตจากแบคทีเรีย *B. licheniformis* MB80 และ Termamyl 60L พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการย่อยสลายสตาร์ช คือ ใช้ความเข้มข้นน้ำแป้ง 300 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของเอนไซม์ 56 ยูนิตต่อมิลลิลิตรของน้ำแป้ง โดยเอนไซม์ α-amylase ที่ผลิตจากแบคทีเรีย *B. licheniformis* MB80 ต้องควบคุม pH เท่ากับ 7.0 ใช้อุณหภูมิในการย่อย 100 องศาเซลเซียส ไม่มีการเติมปริมาณแคลเซียม ส่วน Termamyl 60L ต้องควบคุม pH เท่ากับ 6.5 ใช้อุณหภูมิในการย่อยเท่ากับ 95 องศาเซลเซียส ไม่มีการเติมปริมาณแคลเซียม สำหรับเวลาที่ใช้ในการผลิตให้ได้ค่า DE ตามต้องการ แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการย่อยผลิตภัณฑ์ให้มีค่า DE ต่างๆของเอนไซม์ Termamyl 60L และเอนไซม์ α-amylase ที่ผลิตจากแบคทีเรีย *B. licheniformis* MB80 โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสตาร์ช (Yankov et al., 1986)

นอกจากนี้ Brook และ Griffin (1987a) ศึกษาการย่อยแป้งข้าวเจ้า 2 พันธุ์ด้วยเอนไซม์ α-amylase (Termamyl 120L®, Novo) แล้ววิเคราะห์ % liquefied starch ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณสตาร์ชที่ละลายอยู่ในน้ำแป้งเปรียบเทียบกับปริมาณสตาร์ชที่มีในแป้งที่ใช้เป็นวัตถุดิบ โดยเตรียมน้ำแป้งร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีการเติม $CaCl_2$ 200 ppm ปรับ pH เป็น 3 ระดับ คือ 5.5 6.5 และ 7.5 ใช้เอนไซม์ α-amylase (Termamyl 120L®, Novo) ร้อยละ 0.01 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก ย่อยที่อุณหภูมิ 60 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 15 นาที พบว่าที่ pH 6.5 มี % liquefied starch สูงขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ย่อย โดย % liquefied starch สูงสุดที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส สำหรับแป้งข้าวเมล็ดยาวมี %liquefied starch เท่ากับ 82.18 และสำหรับข้าวเมล็ดสั้นเท่ากับ 86.52 ซึ่งพบว่าข้าวเมล็ดสั้นมี % liquefied starch สูงกว่าแป้งข้าวเมล็ดยาว ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก gelatinized temperature ของข้าวเมล็ดสั้น (70 องศาเซลเซียส) ต่ำกว่าข้าวเมล็ดยาว (76.3 องศาเซลเซียส) นอกจากนี้ยังพบว่า pH มีผลต่อ % liquefied starch และน้ำตาลรีดิวซ์ โดยเมื่อทำการย่อยที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส พบว่า pH เท่ากับ 6.5 ผลิตภัณฑ์จะให้ % liquefied starch และน้ำตาลรีดิวซ์สูงที่สุดทั้งในแป้งจากข้าวเมล็ดยาวและข้าวเมล็ดสั้น โดยพบว่าแป้งข้าวเมล็ดสั้นให้ % liquefied starch และน้ำตาลรีดิวซ์ สูงกว่าแป้งข้าวเมล็ดยาว ซึ่งก็ด้วยเหตุผลเดียวกับที่กล่าวมาแล้ว จะเห็นว่าพันธุ์ข้าวส่งผลต่อ % liquefied starch และน้ำตาลรีดิวซ์ เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุณหภูมิต่างๆ มาวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำตาลมวลโมเลกุลต่ำ (DP1-10) ซึ่งพบว่าแป้งข้าวทั้งสองพันธุ์ให้ค่า DP 1-10 แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าพันธุ์ข้าวที่แตกต่างกันก็ส่งผลให้ปริมาณองค์ประกอบของน้ำตาลมวลโมเลกุลต่ำแตกต่างกัน

Griffin และ Brooks (1989) ปรับปรุงการผลิตมอลโทเดกซ์ทริน เพื่อให้ได้ yield ของมอลโทเดกซ์ทรินสูงขึ้น โดยใช้เอนไซม์ α-amylase แบบขั้นตอนเดียว มีแป้งข้าวเมล็ดสั้นพันธุ์ Nortai เป็นวัตถุดิบ ทำการผลิตโดย เตรียมน้ำแป้งร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก เติม $CaCl_2$ 200 ppm ปรับ pH เป็น 6.5 ใช้เอนไซม์ α-amylase (Termamyl 120L®, Novo) ร้อยละ 0.01 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก ย่อยที่อุณหภูมิ 70 80 90 95 และ 97 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 15 45 และ 75 นาที โดยพบว่าความเข้มข้นของปริมาณแป้งที่ละลายได้ในผลิตภัณฑ์ (liquefied starch) สูงสุด เมื่อใช้อุณหภูมิ 90 และ 95 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที และอุณหภูมิ 80 และ 97 องศาเซลเซียส เวลา 75 นาที และในทุกอุณหภูมิที่ทำการทดลองพบว่าการเพิ่มของเวลาเป็น 75 นาที ไม่ทำให้ผลการทดลองแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นที่ 97 องศาเซลเซียส ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตมอลโทเดกซ์ทรินจากแป้งข้าวพันธุ์ Nortai คือ อุณหภูมิตั้งแต่ 80 องศาเซลเซียสขึ้นไป

โดยเวลาที่ใช้ขึ้นจะอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต ยกตัวอย่างเช่น ถ้าใช้อุณหภูมิ 80 และ 97 องศาเซลเซียส ควรใช้เวลา 75 นาที แต่ถ้าใช้อุณหภูมิ 90 และ 95 องศาเซลเซียส ควรใช้เวลา 45 นาที สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากช่วงอุณหภูมิดังกล่าว เป็นอุณหภูมิที่สูงกว่า gelatinized temperature ของแป้งข้าว (70 องศาเซลเซียส) ดังนั้นจึงเกิดการเจลลาติไนซ์มาก เอนไซม์สามารถเข้าตัดพันธะได้มาก

เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาหาการกระจายตัวของน้ำตาลที่มี DP 1-10 พบว่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จะให้ %DP1-10 สูงกว่าอุณหภูมิอื่นๆ ในการทดลอง และเมื่อใช้อุณหภูมิในการย่อยเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส เวลา 75 นาที ให้ % DP >10 ต่ำที่สุด พิจารณาได้จากตารางที่ 2.5 ซึ่งจะพบว่ามีคาร์โบไฮเดรตมวลโมเลกุลสูงในตัวอย่างนี้น้อยกว่าตัวอย่างอื่น จึงมีแนวโน้มในการเกิดตะกอนหรือความขุ่นต่ำที่สุด ดังนั้นการใช้อุณหภูมิในการย่อยเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส เวลา 75นาที ,จึงเป็นอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตมอลโทเดกซ์ทรินโดยใช้วิธีของ Griffin และ Brooks (1989)

การวิเคราะห์แบบแผน(pattern)ของโมเลกุลคาร์โบไฮเดรตที่ได้จากการแยกและปริมาณ saccharides (DP1-10) โดยการใช้ HPLC ใช้สภาวะดังนี้คือ ใช้ C_{18} 5 μ plastic cartridge column มี solvent คือ 20% acetonitrile - 80% water ตัวอย่าง hydrolyzates ความเข้มข้น 1.0 mg/mL ปริมาตรที่ฉีดเท่ากับ 15 μL โดยมี elution rate เท่ากับ 1.0 mL/min (Brooks and Griffin, 1987b) พบว่า DP1-10 ของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิและเวลาต่างกัน จะให้แบบแผนคล้ายกัน คือ จะได้ ช่วง DP 3 และ DP 6 โดดเด่น ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับในการทดลองของ Morehouse และคณะ (1972) ซึ่งทำการผลิตมอลโทเดกซ์ทรินของสตาร์ชข้าวโพดที่มี DE ≤ 18 โดยมีการเติมเอนไซม์ α-amylase ในกระบวนการผลิต 2 ครั้งด้วยกัน คือ ในครั้งแรกผลิตให้ได้ DE ≤ 3 โดยปรับ pH ของน้ำแป้งให้เป็น 6.5-7.5 เติมเอนไซม์ α-amylase 3000-6000 SKB unit/lb starch บ่มที่อุณหภูมิ 85-95 องศาเซลเซียส ในเวลา 5-20 นาที ให้ได้ starch hydrolyzates ที่มี DE ≤ 3 แล้วจึงทำการเติมเอนไซม์ α-amylase อีกครั้ง โดยจะเติมเอนไซม์ α-amylase 300-3000 SKB unit/lb starch บ่มที่อุณหภูมิ 76 องศาเซลเซียส pH 7-8 จนได้มอลโทเดกซ์ทรินเหลวที่มี DE 8-18 ซึ่งแสดงแบบแผนองค์ประกอบคาร์โบไฮเดรตมวลโมเลกุลต่ำไว้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 ค่า DE และแบบแผนโมเลกุลคาร์โบไฮเดรตของมอลโทเดกซ์ทรินที่ได้จากการผลิตโดยการใช้เอนไซม์ α-amylase แบบขั้นตอนเดียวย่อยแป้งข้าว [a] (Brook and Griffin, 1989)

Temperature (°C)	Time (min)	DE	%DP1-10	%DP1-10:DE	%DP>10
70	15	6.29	19.26	3.06	80.74
	45	8.71	26.00	2.99	74.00
	75	11.04	34.60	3.13	65.4
80	15	5.08	24.26	4.78	75.74
	45	8.13	31.57	3.88	68.43
	75	10.00	40.95	4.10	59.09
90	15	3.75	16.09	4.29	83.91
	45	5.46	20.93	3.83	79.07
	75	8.08	29.64	3.67	70.36
95	15	4.07	15.68	3.85	84.32
	45	5.69	21.32	3.75	78.68
	75	8.16	28.97	3.55	71.03
97	15	4.02	14.94	3.72	85.06
	45	5.55	19.27	3.47	80.73
	75	5.96	19.08	3.20	80.92

[a] Values expressed on a liquefied starch basis

ตารางที่ 2.6 แบบแผนโมเลกุลคาร์โบไฮเดรตของผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่ผลิตโดยการใช้เอนไซม์ α-amylase แบบ 2 ขั้นตอน แสดงในรูป degree of polymerization (DP) (Morehouse et al., 1972)

DE	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5	DP6	DP7	DP8	DP9	DP10	DP>10
8	1.0	3.5	5.0	4.5	4.0	6.5	6.0	4.0	2.5	2.0	65
10	1.0	5.0	6.5	5.5	4.5	9.0	8.0	5.0	3.0	1.0	52
12	1.0	5.5	7.5	6.5	5.0	11.0	10.0	5.5	3.0	1.0	40
14	1.0	5.5	8.5	6.5	5.5	13.0	12.0	6.0	3.0	1.0	32
16	1.0	5.5	9.5	7.0	6.0	15.0	13.5	6.0	2.5	1.0	30
18	1.0	6.0	10.0	7.0	6.5	17.0	15.5	6.0	2.5	1.0	24

จากตารางที่ 2.6 พบว่ามอลโทเดกซ์ทรินที่ได้จากการย่อยโดยการใช้เอนไซม์ α-amylase แบบ 2 ขั้นตอนนี้ มีน้ำตาลพวกที่มีมวลโมเลกุลสูงในปริมาณต่ำ ทำให้การเกิด retrogradation หรือความขุ่นน้อย โดยพบว่าผลิตภัณฑ์ที่มี DE เพิ่มสูงขึ้น จะมีคาร์โบไฮเดรตมวลโมเลกุลสูง(DP>10) น้อยลง ในขณะที่มีคาร์โบไฮเดรตมวลโมเลกุลต่ำ (DP=1-10) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อใช้เวลาในการย่อยสลายนานขึ้น คาร์โบไฮเดรตมวลโมเลกุลสูงหรือพวกสายยาวก็จะถูกตัดพันธะให้สั้นลง จึงทำให้คาร์โบไฮเดรตมวลโมเลกุลต่ำมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่พวกมวลโมเลกุลสูงมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลิตภัณฑ์ที่มี DP ในช่วง 1-10 พบว่าผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่ได้จะมีปริมาณกลูโคส (DP=1) และมอลโทส (DP=2) ต่ำ โดยมีกลูโคส ≤ 1% และมีมอลโทส ≤ 6% จึงมีความหวานต่ำ การอุ้มน้ำต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าผลิตภัณฑ์ทุกค่า DE จะมี DP3 และ DP6-7 สูง ซึ่งผลที่ได้นี้ก็สอดคล้องกับในงานวิจัยของ McPherson และ Seib (1997) ซึ่งผลิตมอลโทเดกซ์ทรินในช่วง DE 2-3 จากสตาร์ชข้าวสาลี และสตาร์ชข้าวโพด โดยใช้เอนไซม์ α-amylase แบบขั้นตอนเดียว และนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับมอลโทเดกซ์ทรินทางการค้า คือ Paselli SA-2® และ Maltrin M040® นำตัวอย่างทั้ง 4 ชนิด มาแยกและวิเคราะห์ saccharides (DP1-10) ด้วยเครื่อง High - Performance Anion - Exchange Chromatography (HPAEC) ซึ่งใช้ Dionex Carbopac PA1 column (4x250 mm) fitted with a Carbopac Guard column (3x25 mm) ทำการแยกตามวิธีของ Shi และ Seib (1992) ซึ่งพบว่าในช่วง DP 1-20 ของผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินทั้ง 4 ชนิด มีมอลโทไตรโอส (DP3) และ มอลโทเฮปตะโอส (DP7) อยู่มาก

ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่าการใช้เอนไซม์ α-amylase ในการย่อย ก็จะให้แบบแผนของน้ำตาลหรือองค์ประกอบคาร์โบไฮเดรตมวลโมเลกุลต่ำคล้ายกัน

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการคัดเลือกพันธุ์ข้าวซึ่งมีความหลากหลายมา 5 พันธุ์ ควบคุมสภาวะตั้งแต่ปลูก จากนั้นผ่านขั้นตอนการสีเพื่อให้ได้ข้าวสาร นำข้าวสารมาผลิตเป็นแป้งข้าวโดยวิธีโม่แห้ง ศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของแป้งข้าวทั้ง 5 พันธุ์ แล้วจึงนำแป้งข้าวทั้ง 5 พันธุ์นี้มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทริน แล้วจึงนำผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่ได้มาศึกษาสมบัติต่างๆ รวมทั้งตรวจสอบแบบแผนองค์ประกอบน้ำตาลโมเลกุลต่ำ (DP1-7) ของผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่ผลิตจากแป้งข้าวทั้ง 5 พันธุ์นี้โดยใช้ paper chromatography technique และ HPLC