

## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

#### ข้าว (Rice)

ข้าวจัดอยู่ในวงศ์ (family) Gramineae จี้นัส *Oryza* ซึ่งพืชในจี้นัส *Oryza* นี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 พวกใหญ่ๆ คือ

1. ข้าวปลูก (Cultivated rice) ได้แก่ *Oryza sativa* ซึ่งมีความสำคัญทางเศรษฐกิจมากที่สุดเพราะมีการเพาะปลูกกันทั่วไป และ *Oryza glaberrima* เป็นข้าวที่ไม่ค่อยมีความสำคัญมากนัก ซึ่งจะปลูกเฉพาะแถบตะวันตกของทวีปอเมริกาเท่านั้น ข้าวทั้งสองชนิดมีลักษณะต่างกันเล็กน้อยกล่าวคือ ช่อดอกของ *O. glaberrima* ไม่มี secondary branch บน panicle มี ligule สั้น lemma และ palea ไม่มีขน

2. ข้าวป่า (wild rice) มีลักษณะเป็นวัชพืชเมล็ดเล็ก ร่วงง่ายและเมล็ดมีหาง (awn) ในประเทศไทยมีอยู่ 5 พันธุ์ คือ *Oryza perennis*, *Oryza fatua*, *Oryza officinalis*, *Oryza granulata* และ *Oryza ridleyi*

ข้าวเจ้า (*O. sativa*) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 sub-species (ไสว พงษ์เก่า, 2534) คือ *indica* *japonica* และ *javanica*

ความแตกต่างทางสัณฐานวิทยาของข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์ (sub-species) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความแตกต่างทางสัณฐานวิทยาของข้าว indica japonica และ javanica

ลักษณะ	indica	japonica	javanica
ใบ	กว้าง สีเขียวอ่อน	แคบ สีเขียวแก่	กว้าง แข็ง สีเขียวอ่อน
เมล็ด	ยาว ค่อนข้างแบน	สั้น เมล็ดกลม	กว้าง เมล็ดหนา
การแตกกอ	แตกกอมาก	แตกกอปานกลาง	แตกกอน้อย
ต้น	สูง ลำต้นอ่อน	เตี้ย ลำต้นแข็ง	สูง ลำต้นแข็ง
หางของเมล็ด	สั้นมาก	สั้นมากถึงยาว	สั้นมากถึงยาว
ขนของข้าวเปลือก	สั้น	ขนมากและยาว	ขนยาว
การร่วง	เมล็ดร่วงง่าย	เมล็ดร่วงยาก	เมล็ดร่วงยาก
แหล่งปลูก	ไทย อินเดีย พม่า เวียดนาม มาเลเซีย อินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์	ญี่ปุ่น เกาหลี จีน	อินโดนีเซีย

ผลผลิตของข้าวที่ได้จะต้องนำมาผ่านขั้นตอนการสี ซึ่งข้าวที่ผ่านการสีสามารถแบ่งเป็นประเภทตามขนาดของเมล็ดข้าวได้ดังนี้ (Whistler et al., 1984)

1. Head rice หมายถึง ข้าวทั้งเมล็ดและข้าวที่มีขนาด  $3/4$  ของเมล็ด
2. Second head หมายถึง เมล็ดข้าวที่มีขนาด  $1/3$  ถึง  $3/4$  ของเมล็ด
3. Screening หมายถึง เมล็ดข้าวที่มีขนาด  $1/4$  ถึง  $1/3$  ของเมล็ด
4. Brewers หมายถึง เศษเมล็ดข้าวหักที่มีขนาดเล็กที่สุด ซึ่งปกติใช้เติมลงในเครื่องดื่มจำพวกเบียร์ (brewing adjunct)

มีการศึกษาพบว่า ในการสีข้าวแต่ละครั้งจะได้เมล็ดข้าวที่แตกหักประมาณร้อยละ 15 ของเมล็ดข้าวทั้งหมด (Hansen et al., 1981; Chen and Chang, 1984) ซึ่งเมล็ดข้าวที่แตกหักนี้จะถูกขายไปในราคาที่ต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของราคาขายปกติ ดังนั้นจึงมีการนำเอาเมล็ดข้าวหักมาพัฒนาปรับปรุงเพื่อเพิ่มมูลค่าโดยนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ผลิตภัณฑ์อาหารเด็กโปรตีนสูง (Hansen et al., 1981) high fructose rice syrup (Chen and Chang, 1984) และ liquefaction of rice starch (Brooks and Griffin, 1987a)

ข้าวหอมมะลิจัดเป็นข้าวในสายพันธุ์ indica ข้าวพันธุ์นี้เดิมเป็นข้าวพันธุ์พื้นเมือง มีถิ่นกำเนิดในอำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา และมีการปลูกคัดพันธุ์บริสุทธิ์โดยสถานีทดลองข้าวโคกสำโรง จังหวัดลพบุรี ข้าวหอมมะลิเป็นข้าวพันธุ์ที่มีความทนทานต่อความแห้งแล้ง ดินเปรี้ยว และดินเค็มได้ดี ในปี พ.ศ. 2532/33 ประเทศไทยมีเนื้อที่เพาะปลูกข้าวหอมมะลิ 9.945 ล้านไร่ และเพิ่มเป็น 10.545 ล้านไร่ ในปีพ.ศ. 2534/35 เพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 6.03 ขณะที่พื้นที่ปลูกข้าวทั่วประเทศในปีพ.ศ. 2532/33 เท่ากับ 59.195 ล้านไร่ ลดลงเหลือ 55.176 ล้านไร่ ในปี พ.ศ. 2534/35 ลดลงคิดเป็นร้อยละ 6.8 จะเห็นว่าพื้นที่ปลูกข้าวลดลง แต่พื้นที่ปลูกข้าวหอมมะลิกลับเพิ่มขึ้น ซึ่งพื้นที่ปลูกข้าวหอมมะลิคิดเป็นร้อยละ 19.1 ของพื้นที่ปลูกข้าวทั้งหมดในปี พ.ศ. 2534/35 (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2536)

ตารางที่ 2 พื้นที่ปลูก ผลผลิตและผลผลิตต่อไร่ของข้าวทั้งหมดและข้าวหอมมะลิในปี

พ.ศ. 2532/33-2534/35

ปี	พื้นที่ปลูก (ล้านไร่)		ผลผลิต (ล้านตัน)		ผลผลิตเฉลี่ย/ไร่ (กิโลกรัม)	
	ข้าวทั้งหมด	ข้าวหอมมะลิ	ข้าวทั้งหมด	ข้าวหอมมะลิ	ข้าวทั้งหมด	ข้าวหอมมะลิ
2532/33	59.195	9.945	18.48	2.51	312	253
2533/34	58.21	10.71	14.90	2.78	256	260
2534/35	55.18	10.54	17.52	2.77	317	263

สมบัติของข้าวหอมมะลิบางประการสรุปได้ดังนี้ (Juliano et al., 1964)

ลักษณะ	ค่าที่ได้
ความยาวของเมล็ด	10.0 มิลลิเมตร
ความกว้างของเมล็ด	2.3 มิลลิเมตร
อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของเมล็ด	4.3
เปลือก (Hull)	22.6 %
ความหนืดวัดจาก amylograph (แป้ง 50 กรัม:น้ำ 450 มิลลิลิตร)	1,085 B.U.

จากลักษณะบางประการของข้าวหอมมะลิรวมทั้งกลิ่นรส ซึ่งเป็นที่ต้องการของผู้บริโภคทำให้มีการเพิ่มผลผลิตข้าวหอมมะลิเพื่อสนองความต้องการของผู้บริโภคให้เพียงพอ หลังจากนั้นนำข้าวหอมมะลิไปผ่านกระบวนการแปรรูปโดยการนำไปสี จะมีบางส่วนของเมล็ดข้าวเกิดการแตกหัก ข้าวหักเหล่านี้จะถูกขายไปในราคาต่ำทำให้มีการนำข้าวที่แตกหักเหล่านี้ไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆเพื่อเพิ่มมูลค่า โดยเฉพาะการนำไปผลิตเป็นแป้งซึ่งเป็นวิธีการที่มีการปฏิบัติกันโดยทั่วไป

แป้งข้าวเจ้า (Rice flour) หมายถึง แป้งที่ได้จากข้าวขาวซึ่งเป็นข้าวเต็มเมล็ด ข้าวหักใหญ่ ข้าวหักหรือปลายข้าวที่ได้จากการสีข้าวเปลือกเจ้าที่มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Oryza sativa* L. แต่ส่วนใหญ่ได้จากข้าวหักหรือปลายข้าว (มอก. 638-2529)

แป้ง (starch) เป็นองค์ประกอบหลักของแป้ง (flour) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่จะแสดงสมบัติทางกายภาพและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปแป้ง (Lineback and Wongsrikasem, 1980) โดยแป้งจะมีหน่วยพื้นฐาน คือ D-anhydroglucose นั่นคือเมื่อแป้งถูกย่อยด้วยกรดอ่อนหรือเอนไซม์ผลผลิตสุดท้ายที่ได้จากการย่อยแป้งคือ D-glucose ซึ่งลักษณะการจัดเรียงตัวของหน่วยพื้นฐานย่อยนี้ จะจัดเรียงตัวในรูปของโพลิเมอร์ (polymer) ซึ่งมีอยู่ 2 ชนิด คือ อะมิโลส (amylose) และอะมิโลเพคติน (amylopectin)

#### การย่อยสลายแป้ง (Starch hydrolysis)

การย่อยสลายแป้งนับเป็นขั้นตอนแรกในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเกี่ยวกับอาหาร เครื่องดื่ม เคมีและสิ่งทอ (Arasaratnam and Balasubramaniam, 1993) โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายแป้งในขั้นตอนแรกคือ Liquefied starch ซึ่งการย่อยสลายแป้งโดยทั่วไปมีอยู่ 2 วิธี คือ การย่อยด้วยกรด เช่น กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) และการย่อยด้วยเอนไซม์ เช่น แอลฟา-อะมิเลสจากแบคทีเรีย (Bacterial alpha-amylase)

การย่อยสลายแป้งด้วยกรดจะสิ้นเปลืองพลังงานสูงและมีข้อจำกัดหลายประการ ทั้งนี้เพราะสารละลายแป้งจะถูกปรับให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 1.5-2.0 แล้วนำไปให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิ 140 °ซ. เป็นเวลา 5-10 นาที หลังจากนั้นต้องนำผลิตภัณฑ์แป้งที่ผ่านการย่อยสลายแล้วไปผ่านขั้นตอนการกำจัดสารที่ไม่ต้องการอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาของกรด นอกจากนี้สีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลของ Maillard reaction ดังนั้นปัจจุบันจึงมีการนำเอาเอนไซม์มาใช้ในอุตสาหกรรมการย่อยแป้งเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีการพัฒนาสมบัติและประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยสลายแป้งให้มีคุณภาพดียิ่งขึ้น ซึ่งเอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยสลายแป้งที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส (alpha-amylase) ทั้งนี้เนื่องจากเอนไซม์ชนิดนี้มีความจำเพาะในการทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของแป้งในสารละลายแป้ง คือ เอนไซม์จะเข้าทำลายพันธะ  $\alpha$ -1,4 glycosidic ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความสม่ำเสมอ (Morehouse, Malzahn and Day, 1972)

เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ ว่า  $\alpha$ -1,4-glucan-4 glucanohydrolase (EC 3.2.1.1) (Saito and Yamamoto, 1975) โดยทั่วไปเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสจะมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 50,000 ดาลตัน (Whistler et al., 1984) มีสมบัติในการย่อยสลายโมเลกุลของแป้งในลักษณะแบบสุ่ม (random digestion) แบบการย่อยภายในโมเลกุล (endo-enzyme) โดยจะทำการย่อยเม็ดแป้งที่เสียหายอย่างช้าๆ แต่ไม่สามารถย่อยเม็ดแป้งปกติได้และย่อยได้ดีขึ้นเมื่อเม็ดแป้งเกิดเจลาติไนเซชัน (Whistler et al., 1984) การย่อยจะเกิดที่พันธะ  $\alpha$ -1,4 glycosidic ของ  $\alpha$ -D(1-4) glucan โดยจะไม่ทำลายพันธะในมอลโทส อะมิโลส และอะมิโลเพคตินจะเปลี่ยนเป็นกลูโคส มอลโทสและพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีผลให้ความหนืดของสารละลายแป้งลดลงและลดค่า iodine-staining power ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยนั้นคือจะได้สายโซ่ oligosaccharide ที่มีความยาวแตกต่างกัน โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสจะให้  $\alpha$ -configuration ที่คาร์บอนตัวที่ 1 ( $C_1$ ) ของ reducing sugar unit

เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสจัดเป็น calcium metalloenzyme นั่นคือ การทำงานของเอนไซม์จะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อในสารละลายตัวอย่างมีคลอรีนไอออนเป็นองค์ประกอบและถ้ามีแคลเซียมไอออนปนอยู่ในสารละลายจะทำให้เอนไซม์ชนิดนี้คงตัวได้ดียิ่งขึ้น โดยทั่วไปเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสจะคงตัวที่ระดับความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5.5-8.0 (Greenwood and Milne, 1968) แต่ถ้ามีคลอรีนไอออนเป็นองค์ประกอบในสารละลายตัวอย่างพบว่า เอนไซม์จะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ระดับความเป็นกรด-ด่าง 6.5-7.0 และเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่บริสุทธิ์จะสูญเสียประสิทธิภาพการทำงานอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิมากกว่า 50 °C. แต่ถ้ามีไอออนของแคลเซียมเป็นองค์ประกอบในสารละลายตัวอย่างจะทำให้เอนไซม์ทนความร้อนได้สูงขึ้น ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับแหล่งของเอนไซม์ด้วยว่า เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ใช้นั้นมาจากแหล่งใด โดยทั่วไปสามารถแบ่งแหล่งของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสได้ดังนี้ (Greenwood and Milne, 1968)

1. Higher plant alpha-amylase เป็นเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ได้จากพืชชั้นสูง เช่น ถั่ว ธัญพืชต่างๆ
2. Mammalian alpha-amylase เป็นเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ได้จากสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เช่น น้ำลายของคน ตับอ่อนของหนู
3. Bacterial and fungal alpha-amylase เป็นเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ได้จากแบคทีเรียและเชื้อรา เช่น *Bacillus subtilis* และ *Aspergillus oryzae* ตามลำดับ

แหล่งที่มาของเอนไซม์แต่ละชนิดจะมีผลต่อสมบัติและรูปแบบการทำงานของเอนไซม์ แต่ทั้งนี้ก็ต้องคำนึงถึงความยาวของโมเลกุลแป้งที่ต่อต้านด้วย โดยเอนไซม์จากแหล่งที่ต่างกัน จะมีสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่างและระดับของปัจจัยอื่น (Komolprasert and Ofoli, 1991) เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ได้จากแบคทีเรียและเชื้อราบางชนิดสามารถทนอุณหภูมิสูงได้เป็นเวลานานกว่าเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่มาจากแหล่งอื่น เช่น เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ได้จาก *Bacillus sterothermophilus* สามารถทนความร้อนสูงได้นาน โดยพบว่า

ประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์มีอยู่สูงถึงร้อยละ 70 ของสภาวะปกติ เมื่อนำเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสนี้ไปบ่มที่อุณหภูมิ 85 °ซ. เป็นเวลา 20 ชั่วโมง (Godfrey and Reichelt, 1983)

ปี คศ. 1913 Boidin และ Effront ได้พัฒนาเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่สามารถทนความร้อนสูง (Thermostable  $\alpha$ -amylase) จากเชื้อแบคทีเรียชื่อ *Bacillus amyloliquefaciens* ขึ้นใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ได้นี้จะทนความร้อนได้สูงถึง 90 °ซ. ต่อมามีการนำเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสซึ่งผลิตจากจุลินทรีย์ *Bacillus licheniformis* สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิ 105-110 °ซ. และในปีถัดมาได้มีการนำเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ได้จากเชื้อนี้มาใช้ในทางการค้าโดยใช้ชื่อทางการค้าว่า Termamyl (Birch, Blakebrough and Parker, 1981; Chandra et al., 1980)

เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ทนความร้อนสูงสามารถย่อยสารละลายแป้งจนมีค่า Degree of polymerization (DP) ประมาณ 10 ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายจะมีปริมาณน้ำตาลแต่ละชนิดแตกต่างกันไป เช่น เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ได้จาก *Bacillus licheniformis* จะให้ผลิตภัณฑ์น้ำตาลหลัก คือ maltose maltotriose และ maltopentose ในขณะที่เมื่อใช้เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ได้จาก *Bacillus amyloliquefaciens* จะให้ผลิตภัณฑ์หลักคือ maltohexaose (Birch et al., 1981)

โรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้แป้งเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปจะใช้เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ทนความร้อนในขั้นตอนการผลิตลิเคอร์แฟคชั่น ซึ่งเป็นขั้นตอนแรก ทั้งนี้เนื่องจากเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ทนความร้อนเช่น เอนไซม์ซึ่งได้จากเชื้อ *Bacillus licheniformis* จะมีข้อได้เปรียบเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ไม่ทนความร้อนหลายประการอาทิ สามารถทนต่อสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงได้ดี ใช้ได้ดีที่ระดับค่าความเป็นกรด-ด่างกว้าง และแคลเซียมไอออนไม่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการทำงาน และความคงตัวต่ออุณหภูมิของเอนไซม์มากนัก เป็นต้น (Wingard et al., 1979.; Wiseman, 1985)



อย่างไรก็ตามเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ทนความร้อนก็มีข้อเสีย คือ ยับยั้งปฏิกิริยาการทำงานของเอนไซม์ด้วยความร้อนได้ยาก และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการทำงานระหว่างเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ทนความร้อนกับเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ไม่ทนความร้อนพบว่า เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ทนความร้อนจะมีค่าใช้จ่ายสูงกว่า (Wingard et al., 1979)

เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ได้จากแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* และ *Bacillus stearothermophilus* มีความสามารถในการทนความร้อนได้ดีที่สุด จึงนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมแป้ง (Tamuri et al., 1982.; Kennedy, 1987) โดยเฉพาะปัจจุบันนี้มีการผลิตเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ทนความร้อนจากจุลินทรีย์เหล่านี้ ออกจำหน่ายอย่างแพร่หลาย ทำให้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวางถึงสภาวะที่เหมาะสมในการนำเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม

Chen และ Chang (1984) ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดลิเคอแฟชันของแป้งข้าวเจ้าในการผลิต high-fructose rice syrup และ high-protein rice flour โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต 4 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส ความเข้มข้นของแป้งข้าวเจ้า อุณหภูมิและเวลาในการผลิต แล้วเปรียบเทียบระดับผลผลิตลิเคอแฟชันของแป้งในรูปแบบเปอร์เซ็นต์กลูโคสที่ผลิตได้พบว่า ปัจจัยทั้ง 4 ประการ จะมีผลกระทบต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้และยังพบว่า สมบัติที่แตกต่างกันของเมล็ดข้าวที่ใช้เป็นวัตถุดิบก็จะให้ผลผลิตที่ต่างกัน เช่น ขนาดของเม็ดแป้งที่ได้จากการบดเมล็ดข้าวก็มีผลต่อปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่ผลิตได้ นอกจากนี้ Brooks และ Griffin (1989) ยังศึกษาพบว่า พันธุ์ข้าวและระดับค่าความเป็นกรด-ด่างในการผลิตก็เป็นอีกปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากการย่อยสลายแป้งด้วยเช่นกัน

### มอลโทเดกซ์ทริน (Maltodextrin)

มอลโทเดกซ์ทริน [9050-36-3] มีสูตรโมเลกุล คือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  เป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปประเภทหนึ่งซึ่งได้จากการย่อยสลายแป้ง ประกอบด้วยอะมัยโลสและอะมัยโลเพคตินที่ผ่านการย่อยสลาย (degradation) ด้วยกรดหรือเอนไซม์จนมีค่า Dextrose equivalent (DE) น้อยกว่า 20 และมีค่า Degree of polymerization (DP) ตั้งแต่ 1 ถึง 10 ปกติมอลโทเดกซ์ทรินจะมีขนาดอยู่ในช่วงระหว่าง oligomer ถึง macromolecule (Brooks and Griffin, 1987 ; Swinkels. ; Mora-Gutierrez and Baianu, 1990)

ในระยะแรกมอลโทเดกซ์ทรินจะผลิตในลักษณะเป็นของเหลวคล้ายน้ำเชื่อม (Harjes and Wermer, 1976) ต่อมาได้มีการพัฒนารูปแบบการผลิตโดยนำมอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวที่ได้มาทำให้แห้งด้วยวิธีต่างๆ เช่น spray drying (Anonymous, 1981) extrusion (Lee and Kim, 1990) และ freeze drying (Flink and Gejl-Hansen, 1972) จะได้ผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่เป็นผงหรือเป็นเกล็ด อย่างไรก็ตามมีโรงงานแปรรูปอาหารอีกเป็นจำนวนมากที่นิยมใช้มอลโทเดกซ์ทรินในลักษณะเป็นของเหลว ทั้งนี้เพราะมอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวนี้อาจช่วยลดข้อจำกัดเกี่ยวกับการกระจายตัวของมอลโทเดกซ์ทรินเมื่อผสมลงในผลิตภัณฑ์อื่น (Horn and Kimball, 1976) แต่มอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวก็มีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถเก็บรักษาอมอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำ ที่ระดับความเข้มข้นสูง (70% solid) เป็นเวลานาน ในปัจจุบันยังไม่มีผู้ใดถึงวิธีการทางการค้าในการเตรียมมอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวที่มีความเข้มข้นสูงโดยไม่เกิดความขุ่นมัวขณะเก็บ มอลโทเดกซ์ทรินที่ผลิตทางการค้าในปัจจุบันจะเตรียมโดยการนำแป้งมาละลายน้ำแล้วทำให้เกิดลิเคอเนชันด้วยกรดหรือเอนไซม์จนมีค่า DE ไม่เกิน 15 แล้วจึงใช้เอนไซม์ปรับสลายแป้งอีกครั้งจนมีค่า DE ตามต้องการ (Arnbruster, 1974)

ปัจจุบันการผลิตมอลโทเดกซ์ทรินทางการค้ามีกระบวนการในการผลิต 3 แบบ คือ (Godfrey and Reichelt, 1983)

1. Two stage addition batch process

วิธีนี้เป็นวิธีการผลิตลิเคอแฟชันของแป้งแบบกะ (batch) คือ จะแบ่งกระบวนการในการผลิตเป็น 2 ช่วง และมีขั้นตอนการเติมเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสสองครั้ง โดยใช้อุณหภูมิต่ำในการผลิต แต่จะใช้เวลาในการผลิตค่อนข้างนานคือประมาณ 30 ถึง 35 นาที

2. Continuous enzyme starch liquefaction

วิธีนี้เป็นวิธีการผลิตมอลโทเดกซ์ทรินแบบต่อเนื่อง ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงในการผลิต จึงมีการพัฒนาเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่สามารถทนความร้อนสูงขึ้น โดยเฉพาะเอนไซม์ที่ได้จากเชื้อ *Bacillus licheniformis* ซึ่งสามารถทนความร้อนสูงกว่า 95 °C. และทนความร้อนที่อุณหภูมิที่ 105-110 °C. ได้ในช่วงเวลาสั้นๆ วิธีนี้เหมาะที่จะใช้กับแป้งที่ได้จากมันฝรั่งและธัญพืช

3. Dual enzyme addition jet cooking process

วิธีนี้เป็นวิธีการผลิตมอลโทเดกซ์ทรินโดยมีการเติมเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสสองครั้งเหมือนวิธีที่ 1 แต่จะมีการผลิตเป็นแบบต่อเนื่องเหมือนวิธีที่ 2 ดังนั้นวิธีนี้จึงเป็นวิธีผสมระหว่างวิธีที่ 1 และ 2 วิธีนี้เหมาะที่จะใช้ในการเตรียมมอลโทเดกซ์ทริน มอลโทส DE 42-63 กลูโคสและไอโซกลูโคสไซรับ

การผลิตมอลโทเดกซ์ทรินทางการค้าสามารถแบ่งขั้นตอนการผลิตเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. ขั้นตอนการผลิตลิเคอแฟชันของแป้ง ขั้นตอนนี้จะใช้กรดหรือเอนไซม์ในการย่อยสลายแป้งเพื่อให้เกิด liquefied starch

2. ขั้นตอนการผลิตมอลโทเดกซ์ทริน ขั้นตอนนี้จะเป็นช่วงที่มีการปรับค่า DE ของ liquefied starch ให้มีค่าตามต้องการ ช่วงนี้จะใช้เอนไซม์ในการผลิต

Morehouse และคณะ (1972) พบว่า การย่อยสลายแป้งด้วยเอนไซม์ในขั้นตอน liquefied starch สำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีค่า D.E. ต่ำกว่า 30 นั้น จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีกว่าการใช้กรดในการผลิต ทั้งนี้เพราะเอนไซม์จะมีความจำเพาะต่อพันธะของแป้งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความสม่ำเสมอมากกว่าการใช้กรด และการใช้กรดในการย่อยแป้งจะให้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสค่อนข้างสูง จึงไม่เหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีค่า DE ต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่ามอลโทเดกซ์ทรินที่ได้จากการย่อยแป้งด้วยกรดจะมีแนวโน้มในการตกตะกอนและเกิดความขุ่นค่อนข้างสูง ทั้งนี้เนื่องจากการรวมกลุ่มของสายโมเลกุลแป้งที่แตกหักเพียงบางส่วน ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่ต้องการ Whistler และคณะ (1984) ยังกล่าวว่า การใช้กรดในการย่อยสลายจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการปะปนอยู่ในผลิตภัณฑ์สุดท้ายค่อนข้างสูง เช่น 5-hydroxymethyl-2 furfuraldehyde และ anhydroglucose compounds ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในการกำจัดสารที่ไม่ต้องการนี้ออกจากผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่ผลิตได้ นอกจากนี้กรดยังทำให้เกิดการเปลี่ยนสีเนื่องจากปฏิกิริยา Maillard และมีรสขม ในขณะที่ถ้าใช้เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ทนความร้อนสูงย่อยสลายแป้ง สภาวะที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจะมีความรุนแรงน้อยลงและไม่ทำให้เกิดปัญหาเรื่องผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ (Birch et al., 1981) รวมทั้งจะให้ผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่มีคุณภาพดี คือ ละลายน้ำได้ดีและมีความคงตัวสูง

มอลโทเดกซ์ทรินซึ่งมีค่า DE ตั้งแต่ 10 ขึ้นไปในทางการค้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ช่วง DE 10-14 และ ช่วง DE 15-19 (Whistler et al., 1984) โดยสมบัติของมอลโทเดกซ์ทริน จะขึ้นอยู่กับค่า DE และวิธีการในการย่อยสลายแป้งที่ใช้ในการผลิต ซึ่งปัจจัยทั้งสองประการจะมีผลกระทบต่อความสามารถในการละลายของมอลโทเดกซ์ทริน โดยพบว่า มอลโทเดกซ์ทรินที่มีระดับของค่า DE สูง จะให้สมบัติในการละลายน้ำได้ดีกว่ามอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำ ในขณะที่เดียวกันถ้าใช้เอนไซม์ในการย่อยสลายแป้งในการผลิตมอลโทเดกซ์ทริน จะให้ผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินซึ่งมีความเข้มข้นของน้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงในปริมาณต่ำและจะมีสมบัติในการละลายน้ำที่ดีกว่ามอลโทเดกซ์ทรินซึ่งได้จากการย่อยสลายด้วยกรดที่มีค่า DE เท่ากัน และ

เนื่องจากผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินจัดเป็น non-hygroscopic เมื่อเปรียบเทียบกับ corn syrup ดังนั้นมอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำๆ จะดูดความชื้นได้น้อย นอกจากนี้ ความหนืดก็เป็นสมบัติทางกายภาพที่สำคัญอีกประการหนึ่งของมอลโทเดกซ์ทริน โดยค่าความหนืดจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ระดับความเข้มข้นของน้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงหรือปริมาณของแข็งทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 3 และ 4 (Whistler et al., 1984) ซึ่งจากตารางที่ 3 พบว่า เมื่อมอลโทเดกซ์ทรินมีค่า DE ต่ำ เช่น DE 10 จะมีปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำในปริมาณน้อย แต่จะมีน้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก ขณะที่มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE สูง เช่น DE 20 จะมีปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำในปริมาณมากขึ้น แต่จะมีน้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงน้อยลง จะเห็นได้ว่า สมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของมอลโทเดกซ์ทรินขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำตาลที่ปรากฏในผลิตภัณฑ์แป้งซึ่งผ่านการย่อย ดังนั้นถ้ามีผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินสองตัวอย่าง แต่มีวิธีการในการผลิตที่แตกต่างกัน แม้จะมีค่า DE เท่ากัน องค์ประกอบและสมบัติของมอลโทเดกซ์ทรินทั้งสองตัวอย่างก็จะต่างกันด้วย

ปัจจุบันมีการนำมอลโทเดกซ์ทรินมาใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย เช่น ใช้ในการสังเคราะห์สารให้ความหวาน ใช้ในการปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสและความนุ่ม ใช้เป็นสารให้ความข้น ใช้เป็นส่วนผสมเพื่อป้องกันการเกาะติดกันในการผลิตลูกกวาดชนิดแข็ง ใช้เป็นสารช่วยในการกระจาย ใช้เป็นส่วนผสมในอาหารบางชนิด ใช้แทนไขมันในอาหารที่ไม่ต้องการพลังงานสูง ใช้เป็นส่วนผสมที่ช่วยรักษาความชื้น ใช้เป็นสารป้องกันการจับตัว ใช้เป็นสารแครีเออร์ ป้องกันการตกผลึกในผลิตภัณฑ์ (Anonymous, 1981; Brooks and Griffin, 1988; Horn and Kimball, 1976 ; Harjes and Wermer, 1976; Richter, 1976)

ตารางที่ 3 การกระจาย (distribution) ของน้ำตาลชนิดต่างๆใน Liquefied starch  
ที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์

Degree of polymerization	% by weight carbohydrate dry basis		
	10 DE	15 DE	20 DE
	1	0.3	0.7
2	3.4	5.5	7.6
3	4.3	6.9	9.4
4	3.5	5.2	6.9
5	3.6	5.5	7.4
6	7.0	10.6	14.3
>6	77.9	65.6	53.0

ตารางที่ 4 ความหนืดของสารละลายมอลโทเดกซ์ทริน

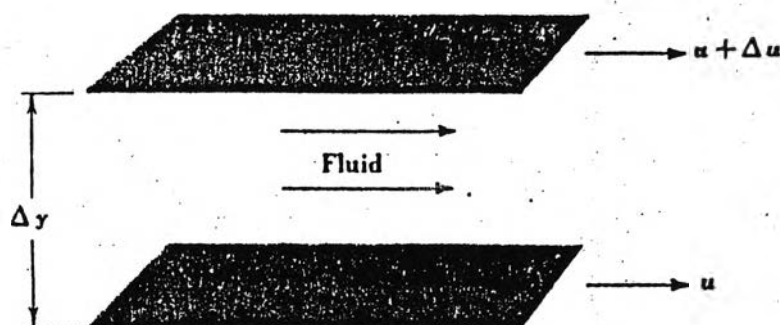
Total solid (%)	VISCOSITY at 37.8 °C, cP		
	Maltodextrin		Corn syrup
	10-15 DE	15-20 DE	25-30 DE
50	125	12.5	1.2
60	1,250	125	12
70	20,000	2000	200

## การศึกษาเกี่ยวกับสมบัติการไหล (Rheological properties)

ความหนืดจัดเป็นสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของของไหลโดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น ซอสชนิดต่างๆ น้ำมัน น้ำผลไม้ เป็นต้น ดังนั้นจึงสามารถแบ่งประเภทของไหลตามสมบัติทางความหนืด สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

### 1. Newtonian fluids

Sir Isaac Newton ได้อธิบายว่า สำหรับ ideal viscous materials แล้วค่า shear stress จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ shear rate ซึ่งลักษณะของของไหลประเภทนี้แสดงดังรูปที่ 1 (Bennett and Myers, 1988 ; Kramer and Twigg, 1966)



รูปที่ 1 แบบจำลองลักษณะการไหลของของไหล

ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมการไหลของของไหลได้ดังสมการ

$$\tau = \mu \left( \frac{\Delta u}{\Delta y} \right) \dots \dots \dots (1)$$

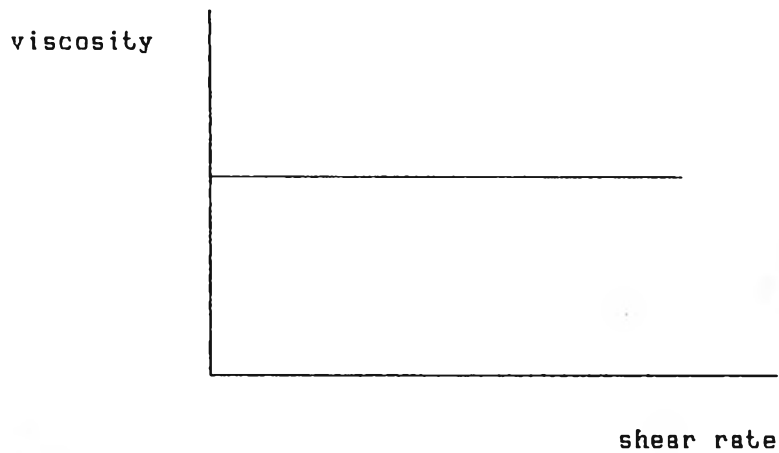
เมื่อ	$\tau$	คือ	shear stress
	$\mu$	คือ	ความหนืดเฉลี่ย (average viscosity)
	$\Delta u$	คือ	ความเร็วของของไหลชั้นบนเมื่อเทียบกับของไหลชั้นล่าง
	$\Delta y$	คือ	ระยะระหว่างชั้นของของไหล 2 ชั้นที่ขนานกัน

ถ้าระยะระหว่างชั้นของของไหล ( $\Delta y$ ) แคบมาก จนใกล้เป็นศูนย์ อาจแปลงสมการ 1 ใหม่ได้ดังสมการที่ 2 (Prentice, 1984; Bennett and Myers, 1988)

$$\tau = \mu \, du/dy \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อ  $du/dy$  คือ shear rate

ของไหลประเภทนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่อ shear rate เปลี่ยนไปแสดงดังรูปที่ 2 ของไหลประเภทนี้ได้แก่ น้ำ น้ำมัน น้ำเชื่อม เป็นต้น



รูปที่ 2 Viscosity curve ของ Newtonian fluids

2. Non-Newtonian Fluids

สารหรือวัตถุใดก็ตามที่มีค่าความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress และ shear rate ไม่เป็นค่าคงที่ (แสดงดังรูปที่ 3) กราฟที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองจะไม่ใช่เส้นตรงหรือเส้นกราฟไม่สามารถลากผ่านจุดเริ่มต้น นั่นคือ ของไหลพวกนี้จะมีค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยน shear rate ซึ่งจะพบมากในอาหารทั่วไป (DeMan et al. 1976)



พฤติกรรมของของไหลในกลุ่มนี้สามารถแสดงได้ด้วยสมการ Power law  
(Bennett and Myers, 1988)

$$\tau = K (du/dy)^n \dots \dots \dots (3)$$

เมื่อ K คือ consistency index

n คือ flow-behavior index

ของไหลประเภทนี้ยังสามารถแบ่งย่อยออกได้อีก เช่น

### 2.1 Pseudoplastic fluids

ลักษณะการไหลของของไหลในกลุ่มนี้ จะได้รับอิทธิพลจากองค์ประกอบหลายประการ เช่น รูปร่าง การจัดเรียงตัวของโมเลกุล ความเข้มข้นของสารละลาย อุณหภูมิและความชื้น ความหนืดของของไหลประเภทนี้จะลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของ shear rate โดยของไหลประเภทนี้มีค่า n (flow-behavior index) น้อยกว่า 1  
(Bennett and Myers, 1988)

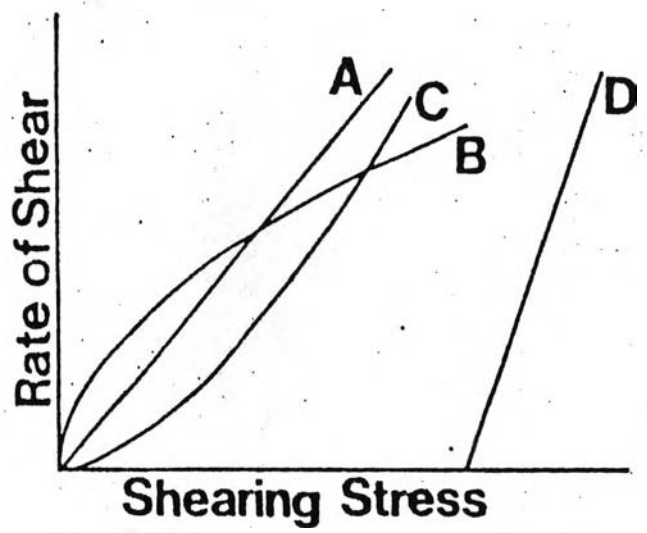
### 2.2 Dilatant fluids

ลักษณะการไหลของของไหลในกลุ่มนี้ จะมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของ shear rate ของไหลในกลุ่มนี้จะมีค่า n มากกว่า 1 (Kramer and Twigg, 1966; Bennett and Myers, 1988)

### 2.3 Plastic fluids

ลักษณะการไหลของของไหลในกลุ่มนี้จะมีลักษณะคล้ายการไหลของ Pseudoplastic fluids นั่นคือ ความหนืดจะลดลงเมื่อมีการเพิ่ม shear rate แต่จะต่างจาก Pseudoplastic fluids คือ ของไหลจะไหลได้เมื่อให้ค่า shear stress สูงกว่าค่า yield value ( $\tau_0$ ) ของของไหล ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการ (Kramer and Twigg, 1966; Bennett and Myers, 1988)

$$\tau = \tau_0 + K (du/dy)^n \dots \dots \dots (4)$$



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Shearing Stress และ Rate of Shear ของของไหลประเภทต่างๆ

- เมื่อ
- A = Newtonian fluid
  - B = Dilatant fluid
  - C = Pseudoplastic fluid
  - D = Plastic fluids

3 Thixotropy

ความหนืดของของไหลจะลดลงตามฟังก์ชันของ shear time พฤติกรรมการไหลเป็นผลเนื่องจาก interaction ของ dispersed particles ที่มารวมตัวกันเป็นโครงสร้างสามมิติความหนืดจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป โดยมี shear rate คงที่ของไหลที่อยู่ในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะมีลักษณะกลับไปมาระหว่าง isothermal sol (fluid) และ gel (solid)

จากข้อมูลดังกล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า มอลโทเดกซ์ทรินเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม แต่มอลโทเดกซ์ทรินที่มีจำหน่ายในท้องตลาดส่วนใหญ่ผลิตจากแป้งข้าวโพดและข้าวโอ๊ต ทำให้ประเทศไทยต้องสั่งซื้อมอลโทเดกซ์ทรินจากต่างประเทศเข้ามา ดังนั้นการผลิตมอลโทเดกซ์ทรินจากเมล็ดข้าวหักซึ่งเป็นวัตถุดิบภายในประเทศ จะเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดการนำเข้ามอลโทเดกซ์ทรินจากต่างประเทศ โดยในงานวิจัยนี้จะแบ่งการศึกษาเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า DE ที่ได้กับความเข้มข้นของเอนไซม์ อุลทราและเวลาในการผลิต ส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาสมบัติทางการไหลของมอลโทเดกซ์ทริน ซึ่งเป็นสมบัติทางกายภาพที่สำคัญในการนำผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่ผลิตได้ไปใช้ประโยชน์ ส่วนที่ 3 เป็นการศึกษาการนำมอลโทเดกซ์ทรินที่ผลิตได้มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ โดยในงานวิจัยนี้จะนำมาผลิตน้ำสลัดชนิดข้น