

## บทที่ 5

### วิจารณ์ผลการทดลอง

#### ส่วนที่ 1 การผลิตแป้งข้าวและวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของแป้งข้าว

##### 5.1 ผลผลิตของแป้งข้าวที่ได้จากการแปรรูปข้าวสารเป็นแป้งข้าวโดยการโม่แห้งและความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตแป้งข้าวที่ได้กับองค์ประกอบทางเคมี

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้ร้อยละผลผลิตแป้งข้าวแตกต่างกันไป คือ พันธุ์ข้าว พบว่าข้าวต่างพันธุ์จะให้ผลผลิตแป้งข้าวแตกต่างกัน (ตารางที่ 4.1) และพบว่าพันธุ์ข้าวเหนียวเมื่อไม่แป้งแล้วให้ร้อยละผลผลิตสูงกว่าพันธุ์ข้าวเจ้า (ตารางที่ 4.2) นอกจากพันธุ์ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญแล้ว ความแกร่งของเมล็ดหรือความต้านทานต่อการแตกหักของเมล็ดน่าจะเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ แม้จะยังไม่มีการวิจัยใดที่รายงานถึงเรื่องความแกร่งของเมล็ดที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตของแป้งข้าวที่ได้จากการโม่แห้งก็ตาม

เมล็ดข้าวที่มีความแกร่งของเมล็ดมากน่าจะมีแนวโน้มที่จะถูกโม่ได้ยาก ทั้งนี้เพราะเมล็ดข้าวมีความต้านทานต่อการแตกหัก หรือแรงกลสูง บุญลักษณ์และคณะ (2517) รายงานถึงการวิเคราะห์ความแกร่งของเมล็ดทางอ้อมโดยใช้การโม่ข้าวที่มีลักษณะเมล็ดสมบูรณ์ไม่มีรอยร้าวในเมล็ดปริมาณหนึ่งด้วยเครื่องบดในระยะเวลาคงที่ จากนั้นนำข้าวที่ผ่านการบดนี้มาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 80 mesh แล้วชั่งน้ำหนักส่วนของข้าวที่ไม่สามารถลอดผ่านตะแกรงได้ ถ้าข้าวที่ไม่สามารถลอดผ่านตะแกรงมีน้ำหนักมาก หมายความว่าข้าวพันธุ์นั้นมีความแกร่งของเมล็ดสูง มีความต้านทานต่อการแตกหักของเมล็ดสูง

งานวิจัยนี้ผลิตแป้งข้าวโดยวิธีโม่แห้งให้แป้งทั้งหมดผ่านตะแกรงขนาดขนาด 100 mesh ได้ จากการสังเกตพบว่าข้าวเหนียวถูกโม่เป็นแป้งโดยผ่านตะแกรง 100 mesh ทั้งหมดได้ง่ายกว่าข้าวเจ้า โดยจะใช้เวลาและจำนวนครั้งที่ไม่น้อยกว่าข้าวเจ้า การสูญเสียน้ำหนักของแป้งออกไปโดยการฟุ้งกระจาย ติดตามขอบภาชนะหรือตะแกรงของเครื่องโม่และเครื่องปั่นจึงน้อยกว่าข้าวเจ้า ทำให้มีร้อยละผลผลิตแป้งข้าวสูงกว่าข้าวเจ้า จึงอาจกล่าวโดยทั่วไปได้ว่าข้าวเหนียวมีความแกร่ง

ของเมล็ดน้อยกว่าข้าวเจ้า จึงให้ผลผลิตแบ่งข้าวมากกว่า เพราะสูญเสียในระหว่างกระบวนการไม่น้อยกว่า

งานวิจัยส่วนใหญ่อธิบายถึงความแกร่งของเมล็ด หรือความต้านทานต่อการแตกหักของเมล็ดที่มีผลต่อคุณภาพการสีของเมล็ดข้าว โดยพบว่าถ้าเมล็ดข้าวมีความแกร่งต่ำ จะต้านทานการแตกหักของเมล็ดได้ดี ทำให้มีร้อยละข้าวเต็มเมล็ดและต้นข้าว (head rice yield) ต่ำ โดยพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความแกร่งของเมล็ด หรือความต้านทานต่อการแตกหักของเมล็ด คือ ความชื้น ระดับการเป็นท้องไขของเมล็ด และองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ด (เครือวัลย์และคณะ, 2517; ตติย, 2536; 2538; Chandhury and Kunze, 1972; Juliano, 1985; Jongkaewwattana et al., 1993; Juliano and Perez, 1993; Islam et al., 1996; Siebenmorgen et al., 1998)

เมื่อพิจารณาในเรื่องความชื้น พบว่าข้าวสารเหนียว ซึ่งได้แก่ พันธุ์เหนียวสันป่าตอง และพันธุ์ก่ำดอยสะเก็ดมีความชื้นสูงกว่าข้าวสารเจ้า ซึ่งได้แก่ พันธุ์ข้าว ก.วก. 1 พันธุ์ชยันต 1 และพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ตารางที่ 4.3) ทั้งยังพบว่าข้าวเหนียวให้ผลผลิตแบ่งข้าวที่ได้จากการไม่สูงกว่าข้าวเจ้า (ตารางที่ 4.1 และ 4.2) จะเห็นว่าปัจจัยด้านความชื้นนั้นให้ความสัมพันธ์ทางบวกกับปริมาณผลผลิตแบ่งข้าว โดยค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.4683 (ตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.1) ในเรื่องนี้ Chandhury และ Kunze (1972) กล่าวสนับสนุนไว้โดยรายงานว่าลักษณะของเมล็ดสารซึ่งมีผลต่อการดูดความชื้นของเมล็ดข้าว พบว่าเมล็ดสารของข้าวเหนียวจะมีรูพรุนบริเวณผิวมาก จึงสามารถดูดความชื้นได้มากกว่าเมล็ดสารของข้าวเจ้าซึ่งมีผิวเรียบกว่า ทำให้ข้าวเหนียวมีความแกร่งของเมล็ดต่ำกว่าข้าวเจ้า เมื่อนำมาผ่านการไม่จึงมีแนวโน้มที่จะแตกหักง่ายกว่าข้าวเจ้า จึงกล่าวได้ว่าความชื้นเป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งทำให้ร้อยละผลผลิตของแบ่งข้าวเหนียวสูงกว่าแบ่งข้าวเจ้า

องค์ประกอบทางเคมีของแบ่งข้าว (ตารางที่ 4.4 - 4.5) เมื่อวิเคราะห์สหสัมพันธ์กับผลผลิตแบ่งข้าว พบว่าอัมัยโลเพคติน อัมัยโลส โปรตีน และไขมัน ล้วนมีผลต่อร้อยละผลผลิตของแบ่งข้าว (ตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.1 - 4.3) ซึ่งเมื่อพิจารณาจากค่าสหสัมพันธ์ของแบ่งข้าว ทั้ง 5 พันธุ์แล้ว ซึ่งได้แก่ แบ่งข้าว ก.วก. 1 แบ่งข้าวขาวดอกมะลิ 105 แบ่งข้าวชยันต 1 แบ่งข้าวเหนียวสันป่าตอง และแบ่งข้าวก่ำดอยสะเก็ด (ตารางที่ 4.7 รูปที่ 4.1) พบว่าอัมัยโลเพคติน อัมัยโลส และไขมัน เป็นปัจจัยเด่นชัด โดยอัมัยโลสและไขมันให้ความสัมพันธ์ในทางลบ ใน

ขณะที่อัมัยโลเพคตินให้ความสัมพันธ์ในทางบวก เป็นเช่นนี้เพราะอัมัยโลสและไขมันเสริมความแข็งแรงให้กับอัมัยโลเพคตินซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของเม็ดสตาร์ช พบว่าอัมัยโลสสามารถสร้างพันธะกับอัมัยโลเพคตินสายยาวเกิดเป็นเกลียวคู่ ส่งผลให้พันธะภายในเม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงสูง (Balnshard, 1987; Oates, 1997; Biliaderis, 1992) ทั้งยังสร้างพันธะกับไขมันเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความแข็งแรง กล่าวได้ว่าการอยู่ร่วมกันของอัมัยโลส อัมัยโลเพคติน และไขมัน (ดังรูปที่ 2.7) ทำให้โครงสร้างของเม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรง (Choudhury and Juliano, 1980; Morrison, 1981; Morrison et al., 1984; Hizukuri, 1986; 1988; Morrison et al., 1993b) ส่งผลให้เมล็ดข้าวสารมีความแข็งแรงสูง ต้องใช้เวลาและจำนวนครั้งในการโม่สูง ทำให้เกิดการสูญเสียผลผลิตไประหว่างกระบวนการจากการฟุ้งกระจาย หรือติดตามขอบภาชนะ ส่งผลให้ปริมาณผลผลิตหรือร้อยละผลผลิตแบ่งข้าวต่ำ

สำหรับแบ่งข้าวเจ้า 3 พันธุ์ ได้แก่ แบ่งข้าว ก.ว.ก. 1 แบ่งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และแบ่งข้าวชัยนาท 1 พบว่าไขมันส่งผลต่อผลผลิตแบ่งข้าวเจ้ามากที่สุด (ตารางที่ 4.7 และ รูปที่ 4.2) โดยให้ความสัมพันธ์ทางลบกับปริมาณผลผลิตแบ่งข้าวเจ้า ( $r = -0.6324$ ,  $p < 0.05$ ) เนื่องจากไขมันส่งผลให้เม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงของพันธะภายในเพิ่มขึ้น (Morrison, 1981; Hibi, 1994) แต่ไม่อาจสรุปได้ว่าความแข็งแรงของเม็ดสตาร์ชเนื่องมาจากไขมันเพียงตัวเดียวเท่านั้น เนื่องจากไขมันในเม็ดสตาร์ชและในเมล็ดข้าวมีส่วนที่เกิดพันธะกับอัมัยโลสเป็นเกลียวคู่ที่มีความแข็งแรงสูง ซึ่งเกลียวคู่ระหว่างไขมันและอัมัยโลสนี้ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความแข็งแรงของพันธะภายในเม็ดสตาร์ช (Choudhury and Juliano, 1980; Morrison, 1981; Morrison et al., 1984; 1993b; Hizukuri, 1986; 1988)

สำหรับแบ่งข้าวเหนียว ซึ่งได้แก่ แบ่งข้าวท่าดอยสะเก็ด และแบ่งข้าวเหนียวสันป่าตอง พบว่าอัมัยโลส อัมัยโลเพคติน และโปรตีน เป็นปัจจัยที่เด่นชัดที่สุดต่อปริมาณผลผลิตแบ่งข้าวเหนียว (ตารางที่ 4.7 และ รูปที่ 4.3) โดยอัมัยโลเพคตินให้ความสัมพันธ์ทางบวกกับผลผลิตที่ได้ ( $r = 0.8455$ ,  $p < 0.01$ ) ส่วนโปรตีนกับอัมัยโลสให้ความสัมพันธ์ทางลบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ มีค่า  $r = -0.8403$  และ  $-0.8455$  ( $p < 0.01$ ) ตามลำดับ เป็นเช่นนี้เพราะในข้าวเหนียวมีองค์ประกอบหลัก คือ อัมัยโลเพคติน โดยที่อัมัยโลสที่มีในองค์ประกอบจะช่วยเสริมความแกร่งให้กับอัมัยโลเพคตินซึ่งเป็นโครงสร้างหลักดังได้กล่าวไปแล้ว นอกจากนี้ยังพบว่าโปรตีนทำให้เมล็ดมีความแข็งแรงมากขึ้น เนื่องจากพันธะไดซัลไฟด์ของโปรตีนช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างของเม็ดสตาร์ช ทั้งยังทำหน้าที่ยึดเหนี่ยวโครงสร้างและองค์ประกอบอื่นภายใน

เม็ดสตาร์ชไว้ (Nangju and De Datta, 1970; Webb et al., 1981; Jongkaewwattana et al., 1993; Hamaker, 1994) พิจารณาได้จากแป้งข้าวกล้องที่ก่อโดยสะเก็ดมีปริมาณโปรตีน (ตารางที่ 4.4) และอัมยิโลส (ตารางที่ 4.5) สูงกว่าข้าวเหนียวสันป่าตอง ทำให้แป้งข้าวกล้องที่ก่อโดยสะเก็ดมีผลผลิตแป้งข้าวต่ำกว่าแป้งข้าวเหนียวสันป่าตอง (ตารางที่ 4.1)

และด้วยเหตุที่แป้งข้าวเหนียวมีปริมาณอัมยิโลเพคตินสูงกว่าในแป้งข้าวเจ้า มีปริมาณองค์ประกอบของอัมยิโลส ไขมัน และโปรตีน ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่เสริมความแข็งแรงให้เม็ดสตาร์ชน้อยกว่าข้าวเจ้า (ตารางที่ 4.4 และ 4.5) จึงเป็นเหตุให้ปริมาณผลผลิตแป้งข้าวเหนียวมีสูงกว่าแป้งข้าวเจ้า (ตารางที่ 4.2)

## 5.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าว

องค์ประกอบทางเคมีที่วิเคราะห์เป็น proximate analysis ซึ่งประกอบด้วยการวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เถ้า และเส้นใย (ตารางที่ 4.4) จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าพันธุ์ข้าวมีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าว ในงานวิจัยจะพิจารณาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเปรียบเทียบกับปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในข้าวสารจากงานวิจัยของ Hirohata และ Chen (1959) และงานวิจัยของ Juliano และคณะ (1964a) การเปรียบเทียบองค์ประกอบเคมีของแป้งข้าวกับองค์ประกอบเคมีของข้าวสาร เนื่องจากแป้งข้าวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้จากการนำข้าวสารมาทำให้อนุภาคเล็กลงโดยการโม่แห้ง (รูปที่ 3.3) โดยองค์ประกอบเคมีที่พิจารณานั้นได้แก่

- คาร์โบไฮเดรตและเส้นใย

Honesty (1994) อธิบายไว้ว่าชนิดของคาร์โบไฮเดรตที่พบมากที่สุดในการแปรรูปคือสตาร์ช พบว่าข้าวสารแห้งมีสตาร์ชประมาณร้อยละ 90 ของน้ำหนักข้าวสารแห้ง (Champagne, 1996) ส่วนที่เหลืออีกเล็กน้อย คือ เซลลูโลส ฮีมิเซลลูโลส ปิกนิก น้ำตาล และโพลีแซคคาไรด์ชนิดอื่นๆ แต่โดยวิธีการวิเคราะห์จะแบ่งปริมาณคาร์โบไฮเดรตเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนเส้นใย ซึ่งจะประกอบด้วย เซลลูโลส ฮีมิเซลลูโลส และลิกนิน อีกส่วนคือคาร์โบไฮเดรตที่ได้จากการนำร้อยละองค์ประกอบทางเคมีทั้งหมดรวมทั้งร้อยละเส้นใยมาหักลบจาก 100 ซึ่งปริมาณคาร์โบไฮเดรตในส่วนนี้

ประกอบด้วย starch รวมกับน้ำตาล และโพลีแซคคาไรด์ชนิดอื่นๆ ซึ่งปริมาณคาร์โบไฮเดรตในงานวิจัยนี้จะหมายถึงองค์ประกอบในส่วนนี้

แป้งข้าวทั้ง 5 พันธุ์ มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตอยู่ในช่วงร้อยละ 89.10 ถึง 89.91 (ตารางที่ 4.4) ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Hirohata และ Chen (1959) และงานวิจัยของ Juliano และคณะ (1964a) ซึ่งมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตซึ่งมาจากการคำนวณหักลบปริมาณโปรตีน ไขมัน เส้นใยและเถ้า อยู่ในช่วงตั้งแต่ 86.2 ถึง 92.6 และมีปริมาณเส้นใยของแป้งข้าวทั้งหมดอยู่ในช่วงตั้งแต่ร้อยละ 0.33 ถึง 0.67 สอดคล้องกับงานของ Hirohata และ Chen (1959) และงานของ Juliano และคณะ (1964a) ซึ่งอยู่ในช่วงตั้งแต่ร้อยละ 0.1 ถึง 1.0

- โปรตีน

โปรตีนเป็นสารอาหารที่มีในแป้งข้าวมากเป็นอันดับสองรองจากคาร์โบไฮเดรต สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Kjeldahl โดยนำปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่วิเคราะห์ได้คูณด้วยแฟกเตอร์ 5.95 ซึ่งมาจากร้อยละไนโตรเจนที่มีอยู่ในโปรตีนกลูเตลินซึ่งเป็นโปรตีนที่มีมากที่สุด ในข้าว โดยพบว่าโปรตีนกลูเตลิน มีปริมาณไนโตรเจนอยู่ร้อยละ 16.8 (Juliano, 1972) จากงานวิจัยนี้พบว่าแป้งข้าวทั้ง 5 พันธุ์มีปริมาณโปรตีนในช่วง 7.67–10.17 (ตารางที่ 4.4) อยู่ในช่วงเดียวกับในงานของ Hirohata และ Chen (1959) และงานวิจัยของ Juliano และคณะ (1964a) ซึ่งรายงานถึงปริมาณโปรตีนของข้าวสารหลายพันธุ์ไว้ โดยมีปริมาณโปรตีนในช่วงร้อยละ 6.5 ถึง 13.3 เป็นที่น่าสังเกตว่าแป้งข้าวก่ำดอยสะเก็ดมีปริมาณโปรตีนสูงถึงร้อยละ 10.17 ซึ่งสูงกว่าแป้งข้าวพันธุ์อื่นซึ่งมีโปรตีนอยู่ในช่วงร้อยละ 7.67 ถึง 8.55

โดยทั่วไปปริมาณโปรตีนในข้าวสารเฉลี่ยแล้วมีประมาณร้อยละ 7 (Athwal, 1975) แต่พบว่าแป้งข้าวจากข้าวทั้ง 5 พันธุ์มีปริมาณโปรตีนสูงกว่าเฉลี่ยทั้งสิ้น โดยเฉพาะแป้งข้าวก่ำดอยสะเก็ดที่มีปริมาณโปรตีนสูงที่สุด สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะข้าวที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ดูแลต้นโดยใส่ปุ๋ยไนโตรเจนในระยะเวลาที่เหมาะสม ได้แก่ ใส่ปุ๋ยรวมสูตร 15-15-15 หลังปักดำ 7 วัน และใส่ปุ๋ยยูเรียในระยะกำเนิดช่อดอก ซึ่งทั้งสองช่วงเวลาที่ให้ปุ๋ยนั้นเป็นระยะที่ธาตุไนโตรเจนมีประสิทธิผลสูงสุดต่อการเจริญเติบโตของต้นและเมล็ด (Vergara, 1979) มีงานวิจัยหลายงานที่ยืนยันว่าธาตุไนโตรเจนมีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณโปรตีนภายในเมล็ดข้าว เมื่อให้ปริมาณธาตุไนโตรเจนกับต้นข้าวเพิ่มขึ้น ปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าวจะเพิ่มขึ้นด้วย

(บุญลักษณ์และคณะ, 2517; ตติย, 2538; Vergara, 1979; Mosse et al., 1988; Islam et al., 1996; Perez et al., 1996) โดยต้นข้าวจะดูดซึ่ธาตุไนโตรเจนจากดินร้อยละ 1.27 ถึง 2.0 ไปใช้ในการสร้างโปรตีนเก็บสะสมไว้ในใบและลำต้น หลังจากนั้นจะเคลื่อนย้ายโปรตีนดังกล่าวไปยังเมล็ดในขณะที่ข้าวออกรวง (Mosse et al., 1988)

- ไชมัน

ไชมันที่ได้จากงานวิจัยนี้มีปริมาณสูงกว่าที่ได้จากการงานวิจัยของ Hirohata และ Chen (1959) และงานของ Juliano และคณะ (1964a) การที่ปริมาณไชมันจากแบ่งข้าวในงานวิจัยนี้สูงกว่านั้นอาจเนื่องจากการปนเปื้อนจากเยื่อหุ้มเนื้อเมล็ดหรือชั้นแอลิวโรน (aleurone layer) และรำ (germ) ซึ่งขัดสีออกไปไม่หมดในขั้นตอนการขัดสีข้าวกล้องให้เป็นข้าวสาร

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณไชมันจากแบ่งข้าวซึ่งได้จากข้าวสาร 5 พันธุ์ (ร้อยละ 0.89-2.63) กับปริมาณไชมันในข้าวสารและข้าวกล้องจากงานวิจัยของ Hirohata และ Chen (1959) และ Juliano และคณะ(1964a) ซึ่งมีปริมาณไชมันของข้าวสารในช่วงร้อยละ 0.3-1.1 และในข้าวกล้องในช่วงร้อยละ 0.6-3.9 (ตารางที่ 4.4) หรือจากงานของ Kent (1983) ซึ่งพบว่าปริมาณไชมันในข้าวสารและข้าวกล้องเท่ากับ 0.5 และ 2.7 กรัมต่อร้อยกรัมน้ำหนักแห้ง ทำให้สรุปได้ว่าข้าวสารซึ่งนำมาผลิตเป็นแบ่งข้าวในงานวิจัยนี้ มีการปนเปื้อนจากเยื่อหุ้มเนื้อเมล็ดหรือชั้นแอลิวโรน (aleurone layer) และรำ (germ) ซึ่งอาจจะขัดสีออกไปไม่หมด

เนื่องจากเยื่อหุ้มเนื้อเมล็ดของข้าวจะมีเซลภายในตั้งแต่ 1 ถึง 7 ชั้น จึงมีผนังหนา ทั้งยังประกอบด้วยเมล็ดแอลิวโรน (aleurone grain) ซึ่งเป็นแหล่งสะสมโปรตีนชนิดที่มีรูปร่างกลม และเป็นแหล่งสะสมไชมัน โดยไชมันจะมีลักษณะเป็นหยดกลมแทรกอยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นเมื่อมีการปนเปื้อนจากเยื่อหุ้มเนื้อเมล็ดหรือชั้นแอลิวโรน ย่อมต้องทำให้ปริมาณไชมันในแบ่งข้าวจากงานวิจัยนี้มีค่าสูง (Juliano, 1972)

ไชมันที่พบในแบ่งนั้นจะมาจาก 2 แหล่ง คือ ในส่วนเนื้อเมล็ดซึ่งจะอยู่เกาะอยู่กับโปรตีนที่ผิวของเม็ดสตาร์ช เรียกว่า surface lipid หรือ non-starch lipid และที่อยู่ภายในเม็ดสตาร์ช เรียกว่า internal lipid หรือ starch lipid ซึ่งสามารถเกิดสารประกอบกับอัมยิโลสได้ (bound lipids) ในสตาร์ชข้าวเจ้ามีปริมาณไชมันที่เป็น starch lipid ประมาณร้อยละ 0.3-0.4

ส่วนสตาร์ชข้าวเหนียวมีประมาณร้อยละ 0.003 (Champange, 1996) เนื่องจากแป้งข้าวในงานวิจัยไม่มีชั้นตอนสกัดแยกโปรตีนออก เป็นแป้งข้าวที่มีการปนเปื้อนของ surface lipid อยู่มาก ดังนั้นปริมาณไขมันที่ได้จากการทดลองจึงมีปริมาณสูงกว่าสตาร์ช สิ่งที่สุดคล้องกันกับสตาร์ช คือ แป้งข้าวเจ้ามีปริมาณไขมันสูงกว่าแป้งข้าวเหนียว (ตาราง 4.4)

- **เถ้า**

ปริมาณเถ้าในแป้งข้าวทั้ง 5 พันธุ์อยู่ในช่วงร้อยละ 0.28 ถึง 0.59 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hirohata และ Chen (1959) และ Juliano และคณะ (1964a) ซึ่งมีปริมาณเถ้าในข้าวสารร้อยละ 0.4 – 1.9 (ตารางที่ 4.4)

ปริมาณเถ้าที่หาได้นั้นเป็นตัวแทนของเกลือแร่ที่มีอยู่ในแป้งข้าว เกลือแร่ในเมล็ดข้าวมาจากองค์ประกอบและแร่ธาตุของดินที่ใช้ปลูก รวมทั้งปุ๋ยที่ได้รับ (Juliano, 1972) พบว่าในข้าวมีแมกนีเซียม (Mg) ฟอสฟอรัส (P) และโปตัสเซียม (K) เป็นองค์ประกอบหลัก และมีปริมาณแคลเซียม (Ca) คลอไรด์ (Cl) ซิลิกอน (Si) โซเดียม (Na) และเหล็ก (Fe) ในปริมาณเล็กน้อย

- **อัมัยโลสและอัมัยโลเพคติน**

ในการวิเคราะห์แป้งนิยมตรวจเฉพาะปริมาณอัมัยโลส และใช้อัมัยโลสเป็นเกณฑ์ในการแบ่งชนิดของข้าว โดย Juliano (1992) แบ่งประเภทของข้าวออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้คือ อัมัยโลส ร้อยละ 0-2 จัดเป็นข้าวเหนียว (waxy rice), ร้อยละ 2-12 เป็นข้าวอัมัยโลสต่ำมาก (very low amylose rice), ร้อยละ 12-20 เป็นข้าวอัมัยโลสต่ำ (low amylose rice), ร้อยละ 20-25 เป็นข้าวอัมัยโลสปานกลาง (Intermediate amylose rice) และร้อยละ 25-33 จัดเป็นข้าวอัมัยโลสสูง (high amylose rice)

การวิเคราะห์ปริมาณอัมัยโลส โดย Colorimetric method ใช้คุณสมบัติของอัมัยโลสในการทำปฏิกิริยากับสารละลายโปตัสเซียมไอโอดด์-ไอโอดีน (KI - I<sub>2</sub> solution) แล้วให้สารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงิน (Halick and Keneaster, 1956; Hollo and Szeittli, 1968; Juliano, 1971) วัดสีที่เกิดขึ้นด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร ปริมาณอัมัยโลเพคติน ได้จากการคำนวณ โดยนำ 100 ไปหักลบจากร้อยละอัมัยโลส จากปริมาณ

ร้อยละอภัยโลภสามารถจัดประเภทของแป้งข้าวที่ใช้ในงานวิจัยได้เป็น 3 กลุ่ม คือ แป้งข้าวที่มีปริมาณอภัยโลภสูง ได้แก่ แป้งข้าวชยันนาท 1 (29.64) แป้งข้าวที่มีปริมาณอภัยโลภต่ำ ได้แก่ แป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 (18.70) และแป้งข้าวญี่ปุ่น ก.ว.ก. 1 (18.50) และแป้งข้าวที่มีอภัยโลภต่ำมาก ในที่นี้จะเรียกเป็นแป้งข้าวเหนียว ได้แก่ แป้งข้าวกำลังสะเกิด (5.25) และแป้งข้าวเหนียวสันป่าตอง (3.70) (ตารางที่ 4.5 และ 4.6)

### 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าว

องค์ประกอบทางเคมีมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน พบว่าปริมาณอภัยโลภมีความสัมพันธ์ทางลบกับปริมาณอภัยโลภเพคตินเสมอ ไม่ว่าจะเป็นผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแป้งข้าว 5 คือ แป้งข้าว ก.ว.ก. 1 แป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 แป้งข้าวชยันนาท 1 แป้งข้าวเหนียวสันป่าตอง และแป้งข้าวกำลังสะเกิด แป้งข้าวเจ้า 3 พันธุ์ ซึ่งได้แก่ แป้งข้าว ก.ว.ก. 1 แป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และแป้งข้าวชยันนาท 1 หรือแป้งข้าวเหนียว 2 พันธุ์ ซึ่งได้แก่ แป้งข้าวเหนียวสันป่าตอง และแป้งข้าวกำลังสะเกิด สังเกตได้จากค่าสหสัมพันธ์ซึ่งเท่ากับ  $-1.000$  (ตารางที่ 4.8 - 4.10 และ รูปที่ 4.4 - 4.6) เป็นเช่นนี้เนื่องจากปริมาณอภัยโลภเพคตินได้จากการนำร้อยละ 100 ลบด้วยร้อยละอภัยโลภ ดังนั้นค่าสหสัมพันธ์ ( $r$ ) ระหว่างอภัยโลภและอภัยโลภเพคตินจึงเป็น  $-1.000$  เสมอ และอภัยโลภจะมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบอื่นในลักษณะตรงกันข้ามกับอภัยโลภเพคตินเสมอ จึงวิจารณ์ผลในเทอมของอภัยโลภเพียงตัวเดียวเท่านั้น โดยผลของอภัยโลภเพคตินก็จะตรงข้ามกันเสมอ

จากผลการศึกษาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบเคมีของแป้งข้าว 5 พันธุ์ ความสัมพันธ์ที่เด่นชัดมากคือ ความสัมพันธ์ระหว่างอภัยโลภและไขมัน โดยให้ความสัมพันธ์ทางบวกสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น (Choudhury and Juliano, 1980; Morrison et al., 1984; South et al., 1991; Tester and Morrison, 1992) พบว่าในแป้งข้าวทั้ง 5 พันธุ์ให้ค่า  $r = 0.8970$  ( $p < 0.01$ ) (ตารางที่ 4.8) ในแป้งข้าวเจ้า 3 พันธุ์ให้ค่า  $r = 0.6972$  ( $p < 0.05$ ) (ตารางที่ 4.9) แต่ไม่พบความสัมพันธ์นี้ในแป้งข้าวเหนียว (ตารางที่ 4.10)



สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างอภัยโลสและโปรตีนนั้น ไม่พบว่ามีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในแป้งข้าว 5 พันธุ์ แต่พบว่าเมื่อพิจารณาแยกเป็นแป้งข้าวเจ้าและข้าวเหนียวแล้วต่างก็ให้ความสัมพันธ์ในทางบวก ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hamaker และคณะ (1991) ซึ่งรายงานไว้ว่ามีโปรตีนชนิดหนึ่งในข้าว คือ โปรตีน 60 kDa เป็นโปรตีนที่รู้จักกันว่าเป็น waxy gene protein (Villareal and Juliano; 1986) จะเกาะเกี่ยวอยู่ภายในเม็ดสตาร์ช เนื่องจากเป็นโปรตีนที่มีพันธะไดซัลไฟด์สูง และเชื่อกันว่าโปรตีนชนิดนี้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์อภัยโลส และมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอภัยโลส โดย Villareal และ Juliano (1986) พบว่าโปรตีนชนิดนี้พบเป็นปริมาณมากในข้าวอภัยโลสสูงมากกว่าข้าวอภัยโลสต่ำ งานวิจัยของ Hamaker และคณะ (1991) ศึกษาถึงผลของโปรตีนตัวนี้ในข้าวเมล็ดสั้น เมล็ดปานกลาง และเมล็ดยาวพันธุ์ต่างๆทั้งหมด 32 พันธุ์ พบว่าโปรตีน 60 kDa มีความสัมพันธ์ทางบวกกับอภัยโลสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยให้ค่า  $r = 0.96$  ( $p < 0.01$ )

สำหรับโปรตีนในแป้งข้าวนั้นมีงานวิจัยที่แสดงทั้งความสัมพันธ์ในทางบวกและลบกับปริมาณอภัยโลส โดยบุญลักษณ์และคณะ (2517) และ Juliano และคณะ (1964b) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนและอภัยโลสเป็นความสัมพันธ์ทางลบ แต่ตติย (2538) พบว่าความสัมพันธ์นี้ไม่อาจยืนยันได้แน่นอน เนื่องจากในงานวิจัยของเขาศึกษาถึงสมบัติทางชีวเคมีของข้าวไทยพบว่าข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ให้ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอภัยโลสและโปรตีนในข้าวสารเท่ากับ 0.51 ( $p < 0.01$ ) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ในทางบวกสอดคล้องกับในงานวิจัยนี้ แต่ไม่พบความสัมพันธ์นี้ในข้าวพันธุ์ดอนนางนวล ทั้งยังพบอีกว่าในข้าวพันธุ์ ก.ข. 1 ให้ความสัมพันธ์ในทางลบ โดยมีค่า  $r = -0.43$  ( $p < 0.05$ ) จึงกล่าวได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างอภัยโลสและโปรตีนในแป้งข้าวเจ้านั้นไม่อาจสรุปได้แน่นอน แม้ว่า Hamaker และคณะ (1991) จะยืนยันถึงความสัมพันธ์ทางบวกระหว่างโปรตีน 60 kDa กับอภัยโลส แต่เนื่องมาจากโปรตีนในแป้งข้าวนั้นมีหลายชนิดด้วยกัน ซึ่งโปรตีนชนิดอื่นนั้นไม่มีการยืนยันว่ามีความสัมพันธ์ทางบวกกับอภัยโลส จึงเป็นไปได้ว่าข้าวที่มีพันธุ์หลากหลาย จะมีปริมาณโปรตีน 60 kDa แตกต่างกันไป ดังเช่นงานวิจัยของ Villareal และ Juliano (1989) ซึ่งพบว่าปริมาณโปรตีน 60 kDa นั้นจะพบมากในข้าวอินดิโก้ ในขณะที่พบในข้าวจาปอนิก้าในปริมาณน้อยมาก เมื่อวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนทั้งหมดในแป้งข้าวแล้วอาจทำให้ค่าสหสัมพันธ์เป็นลบ ซึ่งต้องขึ้นกับความหลากหลายของพันธุ์ที่ผู้ทำงานวิจัยนั้นเลือกใช้ในการทดลอง แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้พบว่าปริมาณโปรตีนทั้งหมดในแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวให้ความสัมพันธ์ทางบวกกับอภัยโลส จึงอาจสันนิษฐานว่าพันธุ์ข้าวที่ใช้ในงานทดลองของเรานั้นมีโปรตีนชนิด 60 kDa อยู่ในปริมาณสูง

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนและไขมัน ซึ่งพบว่าในแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวต่างก็ให้ความสัมพันธ์ในทางบวกนั้น ไม่มีงานวิจัยใดที่รายงานถึงความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบทางเคมีสองชนิดนี้ แต่ที่ค่าสหสัมพันธ์ ( $r$ ) เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากทั้งโปรตีนและไขมันต่างก็ให้ค่าสหสัมพันธ์ในทางบวกกับอัมัยโลส จึงทำให้โปรตีนและไขมันมีค่าสหสัมพันธ์เป็นบวก

เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างอัมัยโลส อัมัยโลเพคติน โปรตีน และไขมัน ภายในสตาร์ชมีความซับซ้อนมาก โดยเฉพาะความสัมพันธ์ระหว่างอัมัยโลสและโปรตีน หรือความสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนและไขมัน ซึ่งยังไม่อาจอธิบายได้ถึงความสัมพันธ์ขององค์ประกอบเหล่านี้ได้อย่างชัดเจน จึงควรมีการศึกษาถึงความสัมพันธ์ขององค์ประกอบเหล่านี้ต่อไป

#### 5.4 สมบัติทางกายภาพของแป้งข้าวพันธุ์ต่างๆ

5.4.1 กำลังการพองตัว (swelling power) และร้อยละการละลาย (% solubles) ของเม็ดสตาร์ชจากแป้งข้าว และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการพองตัวและค่าการละลายกับองค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าว

สมบัติด้านการพองตัวและการละลายนั้นเกิดจากเม็ดสตาร์ชซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในแป้งเกิดการดูดซับน้ำและมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น จากงานวิจัยนี้พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น กำลังการพองตัวและร้อยละการละลายของเม็ดสตาร์ชในแป้งข้าวทั้ง 5 พันธุ์ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น (ตารางที่ 4.11 - 4.12 และรูปที่ 4.7 - 4.8) เมื่อพิจารณากำลังการพองตัวและร้อยละการละลายในกลุ่มแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แป้งข้าวเหนียวให้ค่ากำลังการพองตัวและร้อยละการละลายสูงกว่าแป้งข้าวเจ้า (ตารางที่ 4.13 - 4.14) ยกเว้นที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าแป้งข้าวเหนียวให้กำลังการพองตัวไม่ต่างจากแป้งข้าวเจ้า (ตารางที่ 4.13) ในขณะที่ให้ค่าการละลายต่ำกว่าแป้งข้าวเจ้า (ตารางที่ 4.14) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เป็นเช่นนี้เนื่องจากเม็ดสตาร์ชแป้งข้าวเหนียวมีแรงยึดโครงสร้างในเม็ดสตาร์ชน้อยกว่าเม็ดสตาร์ชแป้งข้าวเจ้า

แรงยึดเหนี่ยวภายในเมล็ดสตาร์ชจะมากหรือน้อย ขึ้นกับการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้าง เม็ดสตาร์ชของอัมยิลเพคตินและอัมยิลสกายในเมล็ดสตาร์ช รวมทั้งองค์ประกอบเคมีชนิดอื่น ซึ่ง ได้แก่ โปรตีน และไขมัน เมื่อพิจารณาค่าสหสัมพันธ์ขององค์ประกอบเคมีกับกำลังการพองตัว และร้อยละการละลายจากแป้งข้าวทั้ง 5 พันธุ์ (ตารางที่ 4.17 และ 4.18) พบว่าอัมยิลเพคติน และโปรตีนให้ความสัมพันธ์ทางบวกกับกำลังการพองตัวและร้อยละการละลายในเกือบทุก อุณหภูมิ ตรงข้ามกับอัมยิลและไขมัน ซึ่งให้ความสัมพันธ์ทางลบกับแป้งข้าวทั้ง 5 พันธุ์ใน เกือบทุกอุณหภูมิ การพองตัวของเมล็ดสตาร์ชเกิดจากการสูญเสียระเบียบของโครงสร้าง ผลึกอัมยิลเพคตินภายในเมล็ดสตาร์ช (Leach et al., 1959; Tester and Morrison, 1990a) โดยพบว่าอัมยิล และไขมัน เป็นองค์ประกอบที่ทำให้โครงสร้างผลึกของเมล็ดสตาร์ชถูกทำลาย ได้ยากเมื่อได้รับความร้อน (Lii et al., 1995; 1996; Tsai et al., 1997) อัมยิลที่มีขนาด โมเลกุลใหญ่เกิดเป็นเกลียวคู่กับองค์ประกอบอื่นในเมล็ดสตาร์ช โดยเฉพาะอัมยิลเพคตินสายยาว และไขมัน มีผลทำให้แรงยึดเหนี่ยวภายในเมล็ดสตาร์ชเพิ่มสูงขึ้น ต้องใช้พลังงานความร้อนสูงใน การทำให้เมล็ดสตาร์ชพองตัว เมื่อเมล็ดสตาร์ชพองตัวได้ยาก การดูดซับน้ำและการละลาย ของสตาร์ชออกมาจึงเกิดได้จำกัด (Choudhury and Juliano, 1980; Morrison et al., 1984; Blanshard, 1987; Sandhya Rani and Bhattacharya, 1989; Tester and Morrison, 1992; Morrison et al., 1993a; 1993b) ด้วยเหตุนี้กำลังการพองตัวและร้อยละการละลายของแป้งข้าวที่มี อัมยิลเพคตินต่ำ อัมยิลและไขมันสูงจึงมีค่าต่ำ สังเกตได้จากแป้งข้าวเจ้า 3 พันธุ์ คือ แป้ง ข้าว ก.ว.ก. 1 แป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และแป้งข้าวชยันนาท 1 ซึ่งมีปริมาณอัมยิลเพคตินต่ำ ในขณะที่มีอัมยิลและไขมันสูงกว่าแป้งข้าวเหนียว 2 พันธุ์ ซึ่งก็คือ แป้งข้าวเหนียวสันป่าตอง และแป้งข้าวกำลังดอยสะเก็ด (ตารางที่ 4.4 - 4.5) จึงมีกำลังการพองตัวและร้อยละการละลายต่ำ กว่าแป้งข้าวเหนียวทั้ง 2 พันธุ์ (ตารางที่ 4.11 - 4.12) และต้องใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าในการทำลาย โครงสร้างผลึก พิจารณาได้จากที่อุณหภูมิเดียวกันเมล็ดสตาร์ชแป้งข้าวเจ้ามีกำลังการพองตัวและ ร้อยละการละลายต่ำกว่าแป้งข้าวเหนียว สำหรับความสัมพันธ์ของโปรตีนจากแป้งข้าวทั้ง 5 พันธุ์ กับกำลังการพองตัวและร้อยละการละลาย ซึ่งงานวิจัยนี้พบว่ามีความสัมพันธ์ทางบวก (ตารางที่ 4.17 - 4.18) จะขัดแย้งกับงานวิจัยอื่น เนื่องจากพันธะไดซัลไฟด์ในโปรตีนเกาะเกี่ยว เม็ดสตาร์ชและองค์ประกอบภายในเมล็ดสตาร์ชไว้ จึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ยับยั้งและขัดขวางการ พองตัว ยังมีโปรตีนมากเมล็ดสตาร์ชจะมีแรงยึดเหนี่ยวมากต้องใช้อุณหภูมิสูงในการทำลาย โครงสร้างของเมล็ดสตาร์ช (Hamaker and Griffin, 1993) ดังนั้นจึงแยกวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ ระหว่างกลุ่มข้าวเจ้าและข้าวเหนียว (ตารางที่ 4.17 - 4.18) พบความสัมพันธ์ในทางลบของโปรตีน

กับกำลังการพองตัวและร้อยละการละลายสอดคล้องกับในงานวิจัยอื่น ในขณะที่ค่าสหสัมพันธ์ขององค์ประกอบอื่น คือ อมัยโลเพคติน อมัยโลส และไขมัน ก็ยังให้ความสัมพันธ์ดังเดิม กล่าวคือ อมัยโลเพคตินให้ความสัมพันธ์ทางบวก ในขณะที่อมัยโลสและไขมันให้ความสัมพันธ์ทางลบ ดังนั้นจึงกล่าวได้โดยสรุปว่ากำลังการพองตัวของเม็ดสตาร์ช ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงยึดเหนี่ยวภายในเม็ดสตาร์ชเป็นหลัก ซึ่งความแข็งแรงนี้เป็นผลมาจากโครงสร้างการจัดเรียงตัวของอมัยโลสและอมัยโลเพคตินภายในเม็ดสตาร์ช รวมทั้งองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งได้แก่ ปริมาณอมัยโลเพคติน อมัยโลส ไขมัน และโปรตีน

เมื่อพิจารณารูปแบบการพองตัวและการละลายของเม็ดสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวที่อุณหภูมิต่างๆ (รูปที่ 4.7 และ 4.8) พบว่ารูปแบบการพองตัวและการละลายของแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวมีลักษณะต่างกัน

โดยกำลังการพองตัวของเม็ดสตาร์ชแป้งข้าวเจ้า ซึ่งได้แก่ พันธุ์ข้าว ก.วก. 1 พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และพันธุ์ชัยนาท 1 เมื่อให้ความร้อนแล้ว มีลักษณะเป็นการพองตัว 2 ชั้น (รูปที่ 4.7) แสดงถึงพันธะภายในเม็ดสตาร์ชซึ่งจะถูกทำลายที่อุณหภูมิต่างกัน ซึ่ง Leach และคณะ (1959) กล่าวว่าเป็แรงยึดเนื่องจากพันธะภายในโครงสร้างส่วน amorphous และ crystalline ทั้งยังพบว่าลักษณะการพองตัว 2 ชั้นนี้มักเกิดกับเม็ดสตาร์ชจากแป้งธัญชาติ ถ้าสังเกตจากรูปที่ 4.7 จะพบว่า การพองตัว 2 ชั้นนี้เห็นได้ชัดเจนในแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และชัยนาท 1 ในขณะที่แป้งข้าว ก.วก. 1 ให้ผลไม่ชัดเจนนัก ซึ่งน่าจะเป็นเพราะแรงยึดเหนี่ยวโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชจากแป้งข้าว ก.วก. 1 ถูกทำลายได้ง่ายกว่าของแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และแป้งข้าวชัยนาท 1

เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบการละลายของแป้งข้าวเจ้า (รูปที่ 4.8) พบว่าในช่วงอุณหภูมิ 55 ถึง 75 องศาเซลเซียส ร้อยละการละลายจะเพิ่มขึ้นน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนจนอุณหภูมิสูงกว่า 75 องศาเซลเซียส ร้อยละการละลายจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว สังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟ และโดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส พบว่าร้อยละการละลายของแป้งข้าวเจ้าสูงกว่าแป้งข้าวเหนียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 4.12 และตารางที่ 4.14) การที่รูปแบบการละลายของสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าเป็นเช่นนี้เป็นผลมาจากกำลังการพองตัวของเม็ดสตาร์ชแป้งข้าวเจ้า เนื่องจากความแข็งแรงของแรงยึดภายในเม็ดสตาร์ชแป้งข้าวเจ้า ทำให้กำลังการพองตัวของแป้งข้าวเจ้าในช่วงอุณหภูมิต่ำมีค่าน้อย (ตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.7) เมื่อให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจน

อุณหภูมิสูงกว่า 75 องศาเซลเซียส ค่าร้อยละการละลายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (ตารางที่ 4.12 และ รูปที่ 4.8) เพราะเม็ดสตาร์ชเริ่มมีกำลังการพองตัวเพิ่มสูงขึ้น (ตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.7) เนื่องจากความร้อนเข้าไปทำลายพันธะบางส่วนทำให้แรงยึดภายในเม็ดสตาร์ชอ่อนตัวลง โครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ชหลวมขึ้น อมัยโลสที่มีมวลโมเลกุลต่ำซึ่งอยู่บริเวณขอบเม็ดสตาร์ชและสามารถละลายน้ำได้ดีจึงละลายออกมาได้มาก (Foster, 1965; Priestley, 1976; Reddy et al., 1994; Oates, 1997) และที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสพบว่าร้อยละการละลายของแป้งข้าวเจ้า สูงกว่าแป้งข้าวเหนียว (ตารางที่ 4.12 และ 4.14) เป็นเพราะกำลังการพองตัวของแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวที่อุณหภูมินี้ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 4.13) และเนื่องจากแป้งข้าวเจ้ามีปริมาณอมัยโลสสูง อมัยโลสจึงละลายออกมาได้มาก ส่งผลให้ร้อยละการละลายของแป้งข้าวเจ้าที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสสูงกว่าแป้งข้าวเหนียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 4.14)

เมื่อพิจารณารูปแบบของกำลังการพองตัวและร้อยละการละลายของแป้งข้าวเหนียว (รูปที่ 4.7 และ 4.8) พบว่าแป้งข้าวเหนียวมีรูปแบบการพองตัวและการละลายคล้ายกัน คือ เมื่อให้ความร้อนตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส กำลังการพองตัวและร้อยละการละลาย จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และตั้งแต่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ขึ้นไป พบว่ากำลังการพองตัวมีค่าค่อนข้างคงที่ (ตารางที่ 4.11 และ 4.13 และรูปที่ 4.7) ในขณะที่ร้อยละการละลายมีค่าเพิ่มขึ้นในอัตราที่ต่ำมาก (ตารางที่ 4.12 และ 4.14 และรูปที่ 4.8) เป็นเช่นนี้เนื่องจากเม็ดสตาร์ชของแป้งข้าวเหนียวมีการพองตัวสูงสุดตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสแล้ว แต่เนื่องจากแป้งข้าวเหนียวมีปริมาณอมัยโลสต่ำ (ตารางที่ 4.5) ดังนั้นแม้ว่าการพองตัวของเม็ดสตาร์ชข้าวเหนียวจะเกิดอย่างสมบูรณ์ไปแล้ว แต่อมัยโลสที่ละลายออกมามีปริมาณน้อย ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของค่าร้อยละการละลาย เมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นจึงมีอัตราการเพิ่มขึ้นต่ำ

โครงร่างผลึกของเม็ดสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวไม่แตกต่างกัน เมื่อตรวจจสอบด้วย X - ray diffraction พบว่าทั้งแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวมีโครงร่างผลึกแบบ A (Lii et al., 1995; Oates 1996; 1997) กล่าวคือ มีการจัดเรียงตัวของเกลียวอมัยโลเพคตินที่วางขนานกันอย่างหนาแน่น พบว่าเม็ดสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้ามีความเป็นผลึกอยู่ประมาณร้อยละ 37 และ 38 ตามลำดับ (Oates, 1997) แต่เพราะเม็ดสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวมีปริมาณอมัยโลสต่ำมาก (ตารางที่ 4.5) จึงมีผลต่อความแข็งแรงของแรงยึดภายใน

เม็ดสตาร์ช เมื่อให้ความร้อนแก่เม็ดสตาร์ชจึงสามารถทำลายพันธะทั้งในส่วนของ amorphous และ crystalline ได้ง่ายกว่าแป้งข้าวเจ้า จึงส่งผลให้มีกำลังการพองตัวสูงกว่าแป้งข้าวเจ้า

จากงานที่ผ่านมาจะพบว่ากำลังการพองตัวมีความสัมพันธ์กับร้อยละการละลายโดยมีสัดส่วนตรง สามารถยืนยันได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการพองตัวและร้อยละการละลายของแป้งข้าวแต่ละพันธุ์ (รูปที่ 4.11) และเมื่อวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างกำลังการพองตัวและร้อยละการละลายของแป้งข้าวทุกพันธุ์ที่อุณหภูมิเดียวกันก็พบว่ากำลังการพองตัวและร้อยละการละลายมีความสัมพันธ์ในทางบวก ให้ค่า  $r^2 = 0.7918$  (รูปที่ 4.15)

#### 5.4.2 pasting properties ของแป้งข้าว และความสัมพันธระหว่างองค์ประกอบเคมี กับ pasting properties

ในการศึกษา pasting properties ของแป้งข้าวโดยใช้ Brabender viscoamylograph มีปัจจัยที่มีผลต่อการเกิด gelatinization อยู่มาก ไม่ว่าจะเป็น pH แรงที่ใช้ในการกวน จำนวนรอบของการหมุน และความเข้มข้นของน้ำแป้ง ซึ่งในที่นี้ได้ควบคุมปัจจัยทั้งหมดให้เท่ากัน เลือกใช้ความเข้มข้นของน้ำแป้งร้อยละ 8 โดยน้ำหนักแห้ง เพื่อให้ viscoamylogram ของแป้งข้าวทุกพันธุ์สามารถเปรียบเทียบกันได้ เพราะแป้งข้าวชัณษาท 1 มีปัญหาว่าความหนืดที่ร้อยละ 10 มีบางซ้ำที่ให้ค่าความหนืดในช่วง cooling สูงเกินกว่าจะอ่านค่าได้

แป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวมี Brabender viscoamylogram แตกต่างกัน (รูปที่ 4.13 และ 4.14) ซึ่งในการพิจารณา Brabender viscoamylogram มีจุดที่ต้องพิจารณาหลายจุด เนื่องจากมีค่าที่ต้องพิจารณาหลายค่า ดังนั้นจะแยกพิจารณาเป็นค่าค่าไป ดังนี้คือ

- pasting temperature

pasting temperature เป็นอุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มปรากฏ ซึ่งความหนืดจะเกิดขึ้นเมื่อน้ำแป้งได้รับความร้อนแล้วเกิดการเจลาติไนเซชัน ความร้อนทำลายพันธะไฮโดรเจน ทำให้ร่างแหโมเสลล์ภายในเม็ดสตาร์ชอ่อนแอ เม็ดสตาร์ชจึงดูดน้ำและพองตัวขึ้น เป็นผลให้น้ำบริเวณโดยรอบเม็ดสตาร์ชเหลือน้อย เม็ดสตาร์ชที่พองตัวขึ้นจะเคลื่อนไหวได้ยาก ทำให้เกิด

ความหนืดขึ้น พบว่าแป้งข้าวทุกพันธุ์มี pasting temperature แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) (ตารางที่ 4.15) โดยสังเกตได้ว่าพันธุ์ข้าวเหนียวมี pasting temperature ต่ำกว่าพันธุ์ข้าวเจ้า (ตารางที่ 4.15 และ 4.16) เนื่องจากแรงยึดภายในโครงสร้างมีความอ่อนแอกว่าแป้งข้าวเจ้า จึงใช้อุณหภูมิต่ำในการทำละลายแรงยึด ทั้งยังพบว่าเม็ดสตาร์ชแป้งข้าวเหนียวมีค่ากำลังการพองตัว ณ อุณหภูมิที่เกิด pasting temperature ของแป้งข้าวเหนียว (65 องศาเซลเซียส) สูงกว่าแป้งข้าวเจ้า (75 องศาเซลเซียส) (ตารางที่ 4.11 และ 4.13) จึงทำให้ pasting temperature ต่ำ ซึ่งเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง pasting temperature กับองค์ประกอบเคมี (ตารางที่ 4.19) ก็พบว่าอัมยโลส และไขมันให้ความสัมพันธ์ทางบวกในแป้งข้าว 5 พันธุ์ ( $r = 0.8582$  และ  $0.9305$  ตามลำดับ) ขณะที่อัมยโลเพคตินให้ความสัมพันธ์ทางลบกับแป้งข้าว 5 พันธุ์ ( $r = -0.8582$ ) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.01$ ) ซึ่งถ้าพิจารณาในแป้งข้าวเจ้า 3 พันธุ์ จะพบความสัมพันธ์ของไขมันเด่นชัดที่สุด ( $r = 0.8096$ ,  $p < 0.01$ ) สำหรับในแป้งข้าวเหนียวพบว่าทั้งไขมันและโปรตีนให้ความสัมพันธ์ทางบวก ( $r = 0.8095$  และ  $0.8060$ ,  $p < 0.01$ ) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีปริมาณอัมยโลส ไขมัน และโปรตีนสูง ในขณะที่อัมยโลเพคตินต่ำ แรงยึดภายในเม็ดสตาร์ชจะสูง ส่งผลให้ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการทำละลายแรงยึด จึงทำให้แป้งที่มีปริมาณอัมยโลส โปรตีน ไขมันสูง มี pasting temperature สูง นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการพองตัวและร้อยละการละลายกับ pasting temperature ในทางลบ โดยพบว่าค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง pasting temperature และกำลังการพองตัวมีค่าเท่ากับ  $-0.9156$  ( $p < 0.01$ ) ซึ่งหมายความว่าเมื่อกำลังการพองตัวสูง pasting temperature จะต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับข้อเท็จจริงสำหรับร้อยละการละลายนั้นที่พบว่ามีสหสัมพันธ์เป็นลบกับ pasting temperature โดยมีค่าเท่ากับ  $-0.9060$  ( $p < 0.01$ ) เป็นเช่นนี้เพราะร้อยละการละลายมีความสัมพันธ์ทางบวกกับกำลังการพองตัว (รูปที่ 4.15)

- Peak viscosity และ Peak temperature

เมื่อความหนืดปรากฏขึ้นใน viscoamylogram (รูปที่ 4.14) พบว่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนถึงจุดที่ความหนืดของน้ำแป้งสูงสุดหรือ peak viscosity ซึ่งถือเป็นจุดที่เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวเต็มที่ เมื่อเม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัว อัมยโลสบางส่วนภายในโมเลกุลของเม็ดสตาร์ชจะละลายออกมากับน้ำ ถ้าการพองตัวสูงอัมยโลสจะละลายออกมามาก ส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้นมากด้วย (Foster, 1965; Priestley, 1976; Reddy et al., 1994) เนื่องจากแป้งข้าวเหนียวมีความแข็งแรงของแรงยึดภายในเม็ดสตาร์ชต่ำกว่าแป้งข้าวเจ้า ทั้งยังมีความ

สมำเสมอของพันธะภายใน (internal bonding force) มากกว่าแป้งข้าวเจ้า สังเกตได้จาก ความหนืดเริ่มต้นถึงความหนืดสูงสุด ค่าความชันของเส้นกราฟจะพุ่งขึ้นเกือบเป็นเส้นตรงตั้งฉาก กับแกนอุณหภูมิ และความหนืดเพิ่มขึ้นถึงความหนืดสูงสุดได้อย่างรวดเร็ว (รูปที่ 4.14) กล่าวได้ว่าแป้งข้าวเหนียวถูกทำลายแรงยึดได้ง่ายกว่าแป้งข้าวเจ้า มี pasting temperature ต่ำกว่า แป้งข้าวเจ้า (ตารางที่ 4.15) อีกทั้งพันธะภายในเม็ดสตาร์ชสมำเสมอกว่าแป้งข้าวเจ้า เม็ดสตาร์ช แป้งข้าวเหนียวจึงดูดน้ำและเกิดการพองตัวได้เร็วและสูงกว่าแป้งข้าวเจ้า ส่งผลให้ peak temperature ของแป้งข้าวเหนียวต่ำกว่าแป้งข้าวเจ้า (ตารางที่ 4.15 - 4.16) สำหรับแป้งข้าวเจ้า ถ้าพิจารณาค่า peak temperature จะพบว่ามีความเท่ากับ 95 องศาเซลเซียสทุกค่า เป็นเช่นนี้ เนื่องจากแป้งข้าวเจ้ามีแรงยึดภายในเม็ดสตาร์ชสูง ซึ่งเป็นผลมาจากการมีองค์ประกอบอื่น นอกเหนือจากอัมัยโลสและอัมัยโลเพคตินปนเปื้อนอยู่มาก ทำให้สังเกตค่า peak temperature ได้ ไม่ชัดเจน จึงไม่สามารถเปรียบเทียบค่า peak temperature ขององค์ประกอบแป้งข้าวเจ้าได้ ในที่นี้จึงไม่คำนวณค่าสหสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบ กำลังการพองตัว และร้อยละการละลาย แป้งข้าวเจ้ากับ peak temperature แต่วิเคราะห์เฉพาะค่าสหสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบเคมี กำลังการพองตัว และร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิใกล้เคียงกับ peak temperature ของข้าวเหนียว กับ peak temperature ของแป้งข้าวเหนียวเท่านั้น ซึ่งพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อ peak temperature ของแป้งข้าวเหนียว คือ อัมัยโลสและอัมัยโลเพคตินเท่านั้น โดยอัมัยโลสให้ค่าสหสัมพันธ์เป็น 0.7740 ( $p < 0.05$ ) ในขณะที่อัมัยโลเพคตินให้ผลตรงข้าม หรือ กล่าวได้ว่าถ้าแป้งข้าวเหนียวมีอัมัยโลสมากจะให้ค่า peak temperature สูง

สำหรับค่า peak viscosity เนื่องจากแป้งข้าวเจ้าทั้งสามชนิดมี peak viscosity ไม่ชัดเจน จึงไม่วิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ของแป้งข้าวเจ้าดังได้กล่าวไปแล้วข้างต้น แต่เมื่อทำการ วิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง peak viscosity กับองค์ประกอบเคมี (ตารางที่ 4.19) กำลังการ พองตัว และร้อยละการละลายของแป้งข้าวเหนียว พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อ peak viscosity คือ อัมัยโลส โปรตีน ไขมันโดยให้ความสัมพันธ์ทางลบ ในขณะที่อัมัยโลเพคตินให้ความสัมพันธ์ทาง บวก (ตารางที่ 4.19) ซึ่งค่าสหสัมพันธ์นี้ชี้ให้เห็นว่าการที่แป้งข้าวเจ้าก่ออวยสะเกิดและแป้งข้าวเหนียว สันป่าตองมีค่า peak viscosity ต่างกัน (ตารางที่ 4.15 รูปที่ 4.14) เป็นเพราะองค์ประกอบเคมีที่ อยู่ในแป้ง โดยพบว่าที่แป้งข้าวเจ้าก่ออวยสะเกิดมี peak viscosity ต่ำกว่าแป้งข้าวเหนียวสันป่าตอง เป็นเพราะแป้งข้าวเจ้าก่ออวยสะเกิดมีองค์ประกอบของอัมัยโลส โปรตีน และไขมันรวมกันแล้วสูงกว่า แป้งข้าวเหนียวสันป่าตอง (ตารางที่ 4.4 - 4.5) ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้ส่งผลให้แป้งข้าวเจ้าก่ออวย สะเกิดมีแรงยึดภายในสูงกว่าแป้งข้าวเหนียวสันป่าตอง



สำหรับแป้งข้าวเจ้านั้นไม่สามารถสังเกตค่า peak viscosity และ peak temperature ได้อย่างชัดเจนนั้น (รูปที่ 4.14) เป็นเพราะแป้งข้าวเจ้าทั้ง 3 พันธุ์ที่ใช้ในงานวิจัยได้จากวิธีโม่แห้งซึ่งยังคงมีองค์ประกอบทางเคมีเช่นเดียวกับในวัตถุดิบตั้งต้น คือ มีปริมาณอมัยโลส โปรตีน ไขมัน สูง ซึ่งถ้าพิจารณาเปรียบเทียบ viscoamylogram ของแป้งข้าวเจ้าโม่ น้ำ ตราข้างสามเศียร จะพบว่าสามารถสังเกตเห็น peak viscosity ได้อย่างชัดเจน (รูปที่ 4.12) โดยให้ความเข้มข้นของน้ำแป้งเพียงร้อยละ 8 ในขณะที่แป้งข้าวเจ้าจากงานวิจัยแม้ใช้ความเข้มข้นมากถึงร้อยละ 10 (รูปที่ 4.15) ก็ยังคงสังเกต peak viscosity ได้ไม่ชัดเจน การที่แป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยวิธีโม่ น้ำสามารถสังเกตเห็น peak viscosity ได้ชัดเจนนั้นเป็นเพราะวิธีโม่ น้ำจะสกัดเอาโปรตีน ไขมัน ออกไปแล้ว เหลืออยู่ในเม็ดสตาร์ชไม่มากนัก จึงได้สตาร์ชที่มีคุณภาพดีมีสิ่งปนเปื้อนน้อย มีความบริสุทธิ์มากกว่าแป้งข้าวเจ้าที่ใช้ในงานวิจัย นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่ไม่สูงเพียงพอให้เม็ดสตาร์ชของแป้งข้าวเจ้าเกิดการพองตัวสูงสุด ค่า peak viscosity ที่ได้จึงไม่ชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแป้งข้าวเจ้าทั้งสามพันธุ์มีความแข็งแรงของแรงยึดภายในเม็ดสตาร์ชสูง เนื่องจากมีปริมาณอมัยโลส โปรตีนและไขมันในองค์ประกอบสูง จึงจำกัดการพองตัวของเม็ดสตาร์ช ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นในการทำลายพันธะภายในเม็ดสตาร์ช (Hamaker and Griffin, 1990; Tester and Morrison, 1990a; Hamaker et al., 1991; Hamaker and Griffin, 1993; Hibi, 1994; Guraya et al., 1997)

- Breakdown

เมื่อพิจารณาความเสถียรของเม็ดสตาร์ชที่เกิดการพองตัวแล้ว (breakdown) โดยการให้แรงกวนคงที่ค่าหนึ่งเป็นเวลา 20 นาที และพิจารณาถึงความหนืดที่ลดลง โดยคำนวณเป็นอัตราส่วนระหว่าง peak viscosity กับความหนืดสุดท้ายที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 4.15) จะพบว่าแป้งข้าวเจ้ามีความเสถียรต่อแรงกวนที่ได้รับมากกว่าแป้งข้าวเหนียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยค่า breakdown เฉลี่ยของแป้งข้าวเจ้าเท่ากับ 0.98 ซึ่งต่ำกว่าค่า breakdown เฉลี่ยของแป้งข้าวเหนียวซึ่งเท่ากับ 1.50 (ตารางที่ 4.16) นั่นคือแป้งข้าวเหนียวมีความหนืดสุดท้ายที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสต่ำกว่า peak viscosity แสดงให้เห็นว่าเม็ดสตาร์ชที่พองตัวสูงสุดแล้วนั้น ถูกแรงกลหรือแรงเฉือนทำลายไปบางส่วน ทำให้ความหนืดลดลง ค่า breakdown ที่ได้จึงมีค่ามากกว่า 1 สำหรับแป้งข้าวเจ้าพบว่าค่า breakdown เฉลี่ยของแป้งข้าวเจ้ามีค่าต่ำกว่า 1 นั่นคือ peak viscosity มีค่าต่ำกว่าค่าความหนืดสุดท้ายที่

อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าแรงกวนหรือแรงเฉือนที่กระทำต่อน้ำแป้ง ไม่มีผลทำลายเม็ดสตาร์ชที่ฟองตัวแล้วของแป้งข้าวเจ้าทั้ง 3 พันธุ์เลย

ค่า breakdown เป็นค่าที่พิจารณาถึงความเสถียรของเม็ดสตาร์ชที่ฟองตัวแล้วเมื่อได้รับแรงกวน ดังนั้นปัจจัยที่จะมีผลต่อค่านี้จึงควรจะเป็นความแข็งแรงของเม็ดสตาร์ชเป็นสำคัญ ซึ่งถ้าพิจารณาจะพบว่าแป้งข้าวเจ้าให้ค่า breakdown ต่ำกว่าแป้งข้าวเหนียว แสดงว่าความแข็งแรงของแรงยึดภายในเม็ดสตาร์ชสูงกว่าแป้งข้าวเหนียวจึงสามารถทนทานต่อแรงเฉือนที่มากกระทำได้มากกว่า (Choudhury and Juliano, 1980; Morrison et al., 1984; Blanshard, 1987; Sandhya Rani and Bhattacharya, 1989; Tester and Morrison, 1990a; 1992; Morrison et al., 1993a; 1993b; Reddy et al., 1994; Lii et al., 1995; 1996)

เมื่อพิจารณาค่า breakdown ของแป้งข้าวเจ้า 3 พันธุ์เปรียบเทียบกัน (ตารางที่ 4.15) พบว่าแป้งข้าว ก.วก. 1 ให้ค่า breakdown สูงกว่าแป้งข้าวเจ้าอีก 2 พันธุ์ คือ แป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และแป้งข้าวชัยนาท 1 ซึ่งนั่นแสดงว่าแป้ง ก.วก. 1 มีความทนต่อแรงเฉือนได้ต่ำกว่า แสดงถึงแรงยึดภายในเม็ดสตาร์ชของแป้งข้าว ก.วก. 1 ต่ำกว่าแป้งข้าวเจ้าอีก 2 พันธุ์ เมื่อพิจารณาค่านี้ในแป้งข้าวเหนียวแล้วพบว่า แป้งข้าวก่ำดอยสะเก็ดให้ค่า breakdown สูงกว่าแป้งข้าวเหนียวสันป่าตอง ทั้งที่แป้งข้าวก่ำดอยสะเก็ดมีองค์ประกอบเคมีที่ให้ผลต่อความแข็งแรงของแรงยึดภายในเม็ดสตาร์ช (อัมัยโลส โปรตีน ไขมัน) มากกว่าแป้งข้าวเหนียวสันป่าตอง (ตารางที่ 4.4 - 4.5) สันนิษฐานว่าเป็นเพราะแป้งข้าวก่ำดอยสะเก็ดต้องใช้แรงและเวลาในการโม่เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์แป้งข้าวสูงกว่าแป้งข้าวเหนียวสันป่าตอง เม็ดสตาร์ชภายในแป้งข้าวก่ำดอยสะเก็ดจึงถูกทำลายมาก เมื่อหาค่า breakdown แป้งข้าวก่ำจึงให้ค่าสูง

- Setback

แป้งข้าวเจ้าให้ค่า setback มากกว่า 1 (ตารางที่ 4.16) โดยค่า setback เฉลี่ยของแป้งข้าวเจ้าเท่ากับ 2.14 แสดงว่าแป้งข้าวเจ้าเกิดการคืนตัวกลับได้สูง พบว่าแป้งข้าวชัยนาท 1 เกิดการคืนตัวกลับหรือรีโทรเกรเดชันได้สูงสุด (ตารางที่ 4.15) รองลงมาเป็นแป้งข้าวขาวมะลิ 105 และแป้งข้าว ก.วก. 1 ตามลำดับ ส่วนแป้งข้าวเหนียวทั้ง 2 พันธุ์พบว่ามีค่า setback ต่ำกว่า 1 โดยมีค่า setback เฉลี่ยเท่ากับ 1.05 แสดงให้เห็นว่าแป้งข้าวเหนียวมีการคืน

ตัวกลับต่ำมาก ซึ่งถ้าพิจารณาจากค่า setback ของแป้งข้าวเหนียวทั้งสองพันธุ์แล้ว กล่าวได้ว่า แป้งข้าวเหนียวไม่เกิดการคืนตัวกลับ

การเกิดรีโทรเกรเดชันจะเกิดขึ้นภายหลังการเกิดเจลลิตีในเซชันของน้ำแป้งแล้ว โดยเมื่ออุณหภูมิลดลงโมเลกุลของอัมยิโลสที่ละลายน้ำขณะที่เกิดเจลลิตีในเซชัน จะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจน เกิดเป็นร่างแหสามมิติ มีความหนืดมากขึ้นและคงตัวมากขึ้น ดังนั้นในแป้งข้าวที่มีปริมาณอัมยิโลสสูงจึงสามารถเกิดการรีโทรเกรเดชันได้มากกว่าแป้งข้าวที่มีปริมาณอัมยิโลสต่ำ ซึ่งค่าสหสัมพันธ์ระหว่างอัมยิโลสและค่า setback ( $r = 0.9487, p < 0.01$ ) ก็สอดคล้องกับทฤษฎี

ความหลากหลายของสมบัติทางกายภาพที่ปรากฏในแป้งข้าวที่ใช้ในงานวิจัยนั้น พบว่าเป็นผลเนื่องจาก "พันธุ์ข้าว" เป็นหลัก (ตารางที่ 4.20) ซึ่งพบว่าพันธุ์ข้าวที่แตกต่างกันจะมีแรงยึดภายในเม็ดสตาร์ชแตกต่างกัน เนื่องจากองค์ประกอบหลักภายในเม็ดสตาร์ช คือ อัมยิโลเพคติน ซึ่งจะจัดเรียงตัวในลักษณะเป็นโครงร่างผลึก (รูปที่ 2.3) ซึ่งพบว่าข้าวมีลักษณะการจัดเรียงตัวของเกลียวอัมยิโลเพคตินที่วางขนานกันอย่างหนาแน่น โดยพบว่าทั้งในข้าวเจ้าและข้าวเหนียวมีความเป็นผลึกไม่ต่างกันนัก (Oates, 1996; 1997) ดังที่ทราบว่างแรงยึดภายในเม็ดสตาร์ชมีความแตกต่างกัน เพราะปริมาณของอัมยิโลเพคติน อัมยิโลส โปรตีน และไขมันที่รวมกันอยู่ในองค์ประกอบเม็ดสตาร์ช ดังนั้นปัจจัยที่ทำให้แป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้ามีรูปแบบของสมบัติทางกายภาพแตกต่างกันไปนั้น อาจสรุปได้ว่าเนื่องมาจากการจัดเรียงตัวของอัมยิโลส อัมยิโลเพคติน โปรตีน และไขมันภายในเม็ดสตาร์ช อีกทั้งปริมาณขององค์ประกอบเหล่านี้ภายในแป้งข้าว แม้ว่าองค์ประกอบเหล่านี้จะมีอยู่ในปริมาณน้อยกว่าอัมยิโลเพคตินมาก แต่พบว่าปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวภายในเม็ดสตาร์ชของแป้งข้าวมีความแตกต่างกัน นอกจากนี้เรื่องขององค์ประกอบเคมีที่กล่าวไปแล้วนั้น ตำแหน่งที่อยู่ ขนาดของอัมยิโลส (มวลโมเลกุล) อัมยิโลเพคติน โปรตีน และไขมันภายในเม็ดสตาร์ชน่าจะเป็นปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่งที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ

## ส่วนที่ 2 การผลิตมอลโทเดกซ์ทรินจากแป้งข้าวพันธุ์ต่างๆ

มอลโทเดกซ์ทรินในงานวิจัยนี้ได้จากการย่อยแป้งข้าวทั้ง 5 พันธุ์ที่ทำการตรวจสอบสมบัติทางเคมีและทางกายภาพแล้ว ด้วยเอนไซม์  $\alpha$ -amylase ซึ่งที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้มีชื่อทางการค้าว่า Termamyl 120L<sup>®</sup> พบว่าสามารถภาวะที่เลือกใช้ สามารถผลิตมอลโทเดกซ์ทรินเหลวที่มี DE 15-20 จากแป้งข้าวทั้ง 5 พันธุ์ ซึ่งได้แก่ แป้งข้าวญี่ปุ่น ก.วก. 1 แป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 แป้งข้าวชยันนาท 1 แป้งข้าวกำลังอดยสะเกิด และแป้งข้าวเหนียวสันป่าตอง จะใช้เวลาในการผลิตแตกต่างกัน และสมบัติที่ได้ก็ต่างกัน

ภายหลังการย่อยทุกครั้งต้องมีการตรวจสอบ residual enzyme activity ว่าเอนไซม์  $\alpha$ -amylase ที่ใช้ในงานวิจัย (Termamyl 120L<sup>®</sup>) ถูกยับยั้งการทำงานอย่างสมบูรณ์แล้ว จึงนำมอลโทเดกซ์ทรินที่ได้ไปตรวจสอบสมบัติต่างๆได้ ในที่นี้พบว่าภาวะที่เลือกใช้ในการยับยั้ง คือ การปรับ pH เป็น 2-3 และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสควบคู่ไปด้วย สามารถยับยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ที่ต้องพิจารณาค่านี้ เนื่องจากถ้าเอนไซม์ยังถูกยับยั้งไม่สมบูรณ์จะมีผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติระหว่างการเก็บ เนื่องจากเอนไซม์  $\alpha$ -amylase จะย่อยผลิตภัณฑ์ต่อไปอีก และที่ต้องใช้ภาวะของกรดร่วมกับการให้ความร้อนเป็นเพราะเอนไซม์  $\alpha$ -amylase เป็นเอนไซม์ที่ทนความร้อนได้สูง การยับยั้ง activity จึงต้องใช้ภาวะที่รุนแรงกว่าเอนไซม์ชนิดไม่ทนร้อน

สำหรับเวลาที่ใช้ในการย่อยเพื่อให้ได้มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE ในช่วง 15-20 พบว่าแป้งข้าว ก.วก. 1 ให้ผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE ในช่วง 15-20 โดยใช้เวลาในการย่อยสั้นที่สุด รองลงมาจะเป็นแป้งข้าวเหนียวสันป่าตองและแป้งข้าวกำลังอดยสะเกิด แป้งข้าวที่ต้องใช้เวลานานที่สุดในการย่อยเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE ในช่วง 15-20 คือ แป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และแป้งข้าวชยันนาท 1 (ตารางที่ 4.21) และเมื่อเปรียบเทียบที่เวลาที่ใช้ในการย่อยเท่ากันจะพบว่ามอลโทเดกซ์ทรินที่ได้จากแป้งข้าว ก.วก. 1 จะให้ค่า DE สูงที่สุด รองลงมาจะเป็นมอลโทเดกซ์ทรินจากแป้งข้าวเหนียว 2 พันธุ์ ซึ่งได้แก่ แป้งข้าวกำลังอดยสะเกิด และแป้งข้าวเหนียวสันป่าตอง แล้วจึงเป็นมอลโทเดกซ์ทรินจากแป้งข้าวเจ้า 2 พันธุ์ ซึ่งได้แก่ แป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และแป้งข้าวชยันนาท 1

ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากแป้งข้าวแต่ละพันธุ์มีสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่ต่างกัน เมื่อพิจารณาจากสมบัติของแป้งข้าวแต่ละพันธุ์ พบว่าแป้งข้าวญี่ปุ่น ก.ว.ก. 1 เป็นแป้งที่มีค่าการพองตัวและค่าการละลายที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสสูงที่สุด (ตารางที่ 4.11 และ 4.12) ทั้งยังมี pasting temperature ต่ำกว่าแป้งข้าวเจ้าอีก 2 พันธุ์ (ตารางที่ 4.15) รวมทั้งปริมาณอมัยโลสที่สูงกว่าแป้งข้าวเหนียวทั้งสองพันธุ์ (ตารางที่ 4.5) ทำให้อมัยโลสที่ละลายออกมาในสารละลายมีมากกว่าแป้งข้าวเหนียว เนื่องจากเอนไซม์  $\alpha$ -amylase เป็น endo-splitting enzyme ซึ่งมีความเฉพาะเจาะจงกับพันธะ  $\alpha$ -1,4-glucosidic โดยจะทำการตัดพันธะแบบสุ่ม (รูปที่ 2.15) (Birch and Blakebrough, 1981) ดังนั้นจึงสามารถย่อยหรือตัดพันธะของอมัยโลสได้มากกว่าอมัยโลเพคติน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีค่า DE 15-20 ในเวลาที่สั้นที่สุด

สำหรับแป้งข้าวเหนียวทั้งสองพันธุ์ ได้แก่ แป้งข้าวเหนียวสันป่าตอง และแป้งข้าวก่ำดอยสะเก็ด ซึ่งใช้เวลาในการย่อยมากกว่าแป้งข้าวเจ้า ก.ว.ก. 1 แต่น้อยกว่าแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และแป้งข้าวชยันนาท 1 ทั้งที่ปริมาณอมัยโลสต่ำกว่า สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการที่อมัยโลสจะละลายออกมาได้มากหรือน้อยนั้นขึ้นกับค่าการพองตัวและค่าการละลายของเม็ดสตาร์ชเป็นสำคัญ และเนื่องจากแป้งข้าวเหนียวทั้งสองพันธุ์มีค่าการพองตัวและการละลายที่สูงมากกว่าแป้งข้าวเจ้าทุกพันธุ์ในช่วงแรกที่ทำให้ความร้อน อีกทั้งมี pasting temperature ต่ำกว่าแป้งข้าวเจ้าทั้ง 3 พันธุ์ (ตารางที่ 4.15) สตาร์ชจึงสามารถเกิดการเจลาติไนซ์ได้ตั้งแต่อุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มปรากฏ (pasting temperature) ทั้งยังพบว่าเม็ดสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวทั้ง 2 พันธุ์ เกิดการพองตัวสูงสุดไปตั้งแต่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสแล้ว (รูปที่ 4.7) ซึ่งการที่เม็ดสตาร์ชพองตัวเต็มที่จะทำให้เอนไซม์สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้อย่างเต็มที่ (Oates, 1997) เมื่อพิจารณาค่าการละลายก็พบว่ามีความสูงกว่าแป้งข้าวเจ้าทุกพันธุ์มาตลอด (รูปที่ 4.8) การที่แป้งข้าวสามารถพองตัวได้มากนั่นเอง ที่ทำให้ปริมาณอมัยโลสและอมัยโลเพคตินจากแป้งข้าวเหนียวทั้ง 2 พันธุ์สามารถละลายออกมาได้มาก เอนไซม์จึงเข้าทำปฏิกิริยากับสตาร์ชได้มาก ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแป้งข้าวเหนียวสันป่าตอง และแป้งข้าวก่ำดอยสะเก็ด ใช้เวลาในการย่อยสั้นกว่ากับแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และแป้งข้าวชยันนาท 1

สำหรับผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE ในช่วง 15-20 ของแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และแป้งข้าวชยันนาท 1 พบว่าต้องใช้เวลาในการย่อยสูงกว่าแป้งข้าวทุกพันธุ์ เพราะแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และแป้งข้าวชยันนาท 1 มี pasting temperature สูงกว่าแป้งข้าวทุกพันธุ์ (ตารางที่ 4.15) ซึ่งนั่นหมายถึงการเกิดเจลาติไนซ์จะเกิดช้ากว่าแป้งข้าวทุกพันธุ์ เป็นที่ทราบดีว่า

เอนไซม์จะทำงานกับสตาร์ชที่เกิดการเจลาติไนซ์แล้วเท่านั้น (Birch and Blakebrough, 1981) ดังนั้นเอนไซม์จึงเข้าทำปฏิกิริยากับสตาร์ชจากแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และแป้งข้าวชัณนาท 1 ได้ช้าที่สุด นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่ากำลังการพองตัวของแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และแป้งข้าวชัณนาท 1 แล้ว พบว่ากำลังการพองตัวของแป้งข้าวเจ้าทั้งสองพันธุ์นี้มีค่าต่ำกว่าแป้งข้าวทุกพันธุ์ในทุกอุณหภูมิ (ตารางที่ 4.11) อีกทั้งเมื่อพิจารณาค่า breakdown ยังพบว่ามีค่า breakdown ต่ำกว่าแป้งข้าวทุกพันธุ์ (ตารางที่ 4.15) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแป้งข้าวทั้งสองพันธุ์นี้มีความคงทนต่อแรงเคี้ยว แสดงถึงความแข็งแรงของแรงยึดเหนี่ยวภายในเม็ดสตาร์ชสูง ซึ่งด้วยเหตุนี้จะทำให้เอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยากับสตาร์ชภายในเม็ดสตาร์ชได้ยาก ถ้าพิจารณาจากร้อยละการละลายพบว่าแป้งข้าวเจ้า 2 พันธุ์นี้มีร้อยละการละลายต่ำกว่าแป้งข้าวทุกพันธุ์ในเกือบทุกอุณหภูมิ ยกเว้นที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเท่านั้นที่พบว่าแป้งข้าวเจ้าทั้งสองพันธุ์นี้มีค่าร้อยละการละลายสูงขึ้น แต่ก็ยังใกล้เคียงกับแป้งข้าวทุกพันธุ์ (ตารางที่ 4.12) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้แป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และแป้งข้าวชัณนาท 1 ต้องใช้เวลาในการย่อยสูงที่สุดเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE อยู่ในช่วง 15-20

ในที่นี้จะพบว่าแป้งข้าวเจ้าทั้ง 3 พันธุ์ ใช้เวลาในการย่อยเพื่อให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE 15-20 ต่างกันมาก โดยแป้งข้าว ก.วก. 1 ใช้เวลาสั้นที่สุด ประมาณ 20 นาที ในขณะที่แป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และแป้งข้าวชัณนาท 1 ต้องใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง ที่เป็นเช่นนี้อาจกล่าวได้ว่าเนื่องมาจากสายพันธุ์ แป้งข้าว ก.วก. 1 เป็นข้าวสายพันธุ์จาปอนิก้าหรือข้าวญี่ปุ่น ในขณะที่แป้งข้าวเจ้าอีก 2 พันธุ์เป็นข้าวอินดิกา ลักษณะของโครงสร้างและแรงยึดเหนี่ยวภายในของแป้งข้าวสองสายพันธุ์นี้ต่างกัน พิจารณาได้จากสมบัติทางกายภาพของแป้งข้าวเหล่านี้ก็จะพบว่า แป้งข้าว ก.วก. 1 มีกำลังการพองตัวและร้อยละการละลายสูงกว่าแป้งข้าวเจ้าอินดิกาทั้ง 2 พันธุ์ ทั้งยังมี pasting temperature ต่ำกว่าแป้งข้าวเจ้าทั้งสองพันธุ์ ทำให้เกิดการเจลาติไนซ์ได้เร็วกว่า อีกทั้งพบว่าค่า breakdown มีค่าสูง ซึ่งแสดงว่าเม็ดสตาร์ชถูกทำลายเพราะแรงเคี้ยวได้มากกว่าแป้งข้าวอินดิกา ด้วยเหตุนี้เองทำให้แป้งข้าว ก.วก. 1 ใช้เวลาในการย่อยเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE ในช่วง 15-20 ต่ำที่สุด

เมื่อนำผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินในช่วง DE 15-20 มาสังเกตลักษณะปรากฏและวัดค่าสี พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้าอินดิกา คือ แป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และแป้งข้าวชัณนาท 1 จะให้ความขุ่นในผลิตภัณฑ์สูง ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งข้าว สังเกตได้จากการที่แป้งข้าว 2 พันธุ์นี้มีค่า setback สูง (ตารางที่ 4.15) ในขณะที่

มอลโทเดกซ์ทรินเหลวที่ได้จากแป้งข้าวอีก 3 พันธุ์มีความใส ซึ่งก็เนื่องจากมีค่า setback ต่ำ (ตารางที่ 4.15)

เมื่อนำผลิตภัณฑ์มาทำการวัดสี พบว่า ค่า a และ ค่า b มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในผลิตภัณฑ์ที่มาจากข้าวทุกพันธุ์ (ตารางที่ 4.23) โดยมอลโทเดกซ์ทรินที่ผลิตจากแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และแป้งข้าวชยันนาท 1 ให้ค่า a และ b สูงที่สุด ในขณะที่ผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียวสันป่าตองและแป้งข้าวกล้องงอกเกิด มีค่า a รองลงมา และพบว่ามอลโทเดกซ์ทรินที่ผลิตจากแป้งข้าว ก.ว.ก. 1 ให้ค่า a ต่ำที่สุด สำหรับค่า b พบว่ามอลโทเดกซ์ทรินที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียวทั้ง 2 พันธุ์ และแป้งข้าว ก.ว.ก. 1 ให้ค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่แตกต่างจากแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และแป้งข้าวชยันนาท 1 โดยพบว่า แป้งข้าวเจ้า 2 พันธุ์นี้ให้ค่า b สูงกว่าแป้งข้าวอีก 3 พันธุ์ การที่แป้งข้าวกล้องงอกเกิดให้ค่า a รองจากแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และแป้งข้าวชยันนาท 1 ทั้งที่แป้งข้าวกล้องงอกมีสีชมพูชัด และการที่แป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และแป้งข้าวชยันนาท 1 ให้ค่า a และ b สูงกว่าแป้งข้าวทุกตัว เป็นเพราะแป้งทั้งสองตัวนี้เกิดความขุ่นขึ้นมาในผลิตภัณฑ์อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งความขุ่นที่เกิดขึ้นนี้ พบว่าแม้ทำการเหวี่ยงแยกด้วยความเร็วรอบสูงถึง 15000 รอบต่อนาที และกรองด้วยกระดาษกรองที่มีความละเอียดมากขนาด 0.45 ไมครอนก็ไม่สามารถขจัดความขุ่นนี้ได้

เมื่อนำผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่ผลิตได้ในช่วง DE เท่ากับ 15-20 มาวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำตาล (DP 1-7) ในเชิงคุณภาพ พบว่าในผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินจากแป้งข้าวทุกพันธุ์ มีองค์ประกอบของน้ำตาล DP 1-7 โดยพบว่า solvent ทั้ง 4 ชนิด ที่เลือกใช้ สามารถแยก DP 1-7 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อทำการ develop 5 ครั้งด้วยกัน (รูปที่ 4.21 - 4.25) โดยพบว่า solvent ที่ 1 และ 2 สามารถแยกองค์ประกอบออกมาจนครบตั้งแต่ develop ครั้งที่ 4 ส่วน solvent ที่ 3 และ 4 นั้น ต้องใช้การ develop 5 ครั้ง จึงจะสามารถแยกองค์ประกอบของน้ำตาล DP 1-7 ได้ (ตารางที่ 4.25 - 4.29) อาจกล่าวได้ว่า solvent ที่ 1 และ 2 สามารถแยกองค์ประกอบของน้ำตาล (DP 1-7) ได้ดีกว่า โดยลักษณะของน้ำตาลแต่ละตัวในมอลโทเดกซ์ทรินตัวอย่างจะค่อยๆ แยกออกมาให้เห็นที่ละจุด (รูปที่ 4.21-4.22 และตารางที่ 4.30 - 4.31) ในขณะที่ solvent ที่ 3 และ 4 แยกองค์ประกอบของน้ำตาล DP 1-7 ได้ไม่ดีนัก น้ำตาลค่อนข้างจะเกาะกลุ่มกัน ค่า R<sub>f</sub> ของน้ำตาลค่อนข้างใกล้เคียงกัน (รูปที่ 4.23 - 4.24 และตารางที่ 4.32 - 4.33) solvent ที่ใช้นั้นนอกจากจะพบว่าสามารถแยกองค์ประกอบของน้ำตาลที่ (DP 1-7) ได้แล้วนั้น ยังพบว่าอาจแยกน้ำตาลที่มี DP สูงกว่านี้ได้อีก ในกรณีที่เพิ่มจำนวนครั้ง

ในการ develop ขึ้น สังเกตจากมอลโทเดกซ์ทรินที่ได้จากการทดลองเมื่อผ่านการ develop 5 ครั้ง และตรวจสอบด้วย detection reagent แล้ว พบว่ามีแถบสีดำเป็นแถบซึ่งยังไม่สามารถแยกออกมาเป็นจุดให้เห็นได้อย่างชัดเจน (รูปที่ 4.21 - 4.24) ซึ่งแถบสีดำนี้มาจากปฏิกิริยาของน้ำตาลกับ detection reagent ที่ใช้นั่นเอง

วิธีที่กล่าวมานี้สามารถแยกได้เฉพาะองค์ประกอบของน้ำตาลทำให้ทราบว่าในผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเล็ก แต่ไม่สามารถระบุปริมาณที่แน่นอนได้ จึงต้องมีการวิเคราะห์ในเชิงปริมาณต่อไป (quantitative method) โดยใช้ HPLC

ในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลโมเลกุลต่ำใน HPLC นั้น ได้นำผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE ใกล้เคียงกันมาใช้ในการฉีด ซึ่งจะพบว่าปริมาณน้ำตาล DP 1-7 จากมอลโทเดกซ์ทรินที่ผลิตจากแป้งข้าว ก.ว.ก. 1 มีค่าสูงสุด รองลงมาเป็นข้าวเหนียวสันป่าตอง ข้าวก่ำดอยสะเก็ด ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวชัยนาท 1 (ตารางที่ 4.34) และเมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนของน้ำตาลในช่วง DP 1-7 ของมอลโทเดกซ์ทรินจากแป้งข้าวทุกพันธุ์ พบว่าให้สัดส่วนที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 4.35) โดยมอลโทเดกซ์ทรินเหลวจากแป้งข้าว ก.ว.ก. 1 แป้งข้าวเหนียวสันป่าตอง ให้สัดส่วนของน้ำตาล DP 5 สูงที่สุด รองลงมา คือ DP 6 และ 3 มอลโทเดกซ์ทรินจากแป้งข้าวก่ำดอยสะเก็ดให้สัดส่วนของน้ำตาล DP 6 สูงที่สุด รองลงมาคือ DP 5 และ 3 ตามลำดับ จะเห็นว่าผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินเหลวจากแป้งข้าว ก.ว.ก. 1 แป้งข้าวเหนียวสันป่าตอง และแป้งข้าวก่ำดอยสะเก็ด ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบของน้ำตาล DP 3, 5 และ 7 ในปริมาณสูง ในขณะที่มอลโทเดกซ์ทรินจากแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และแป้งข้าวชัยนาท 1 ให้องค์ประกอบของน้ำตาล DP 6 สูงสุด รองลงมา คือ DP 5 และ 7 ตามลำดับ แต่โดยสรุปแล้วพบว่าองค์ประกอบของน้ำตาลที่พบจะเป็น DP 3, 5, 6 และ 7 ในปริมาณสูงกว่าน้ำตาล DP ต่ำชนิดอื่น (DP 1, 2 และ 4) ซึ่งนั่นอาจเป็นเพราะแบบแผนของเอนไซม์  $\alpha$ -amylase ซึ่งจะย่อยสลายและให้น้ำตาล DP ต่ำชนิด DP 3, 5, 6 และ 7 ในปริมาณสูง เช่นในงานวิจัยของ Morehouse และคณะ (1989) ซึ่งพบว่ามอลโทเดกซ์ทริน DE 8-18 จากสตาร์ชข้าวโพดที่ผลิตโดยใช้เอนไซม์  $\alpha$ -amylase ให้องค์ประกอบของน้ำตาล DP 3, 6 และ 7 ในปริมาณสูง โดยให้ DP 6 สูงที่สุด รองลงมาเป็น 7 และ 3 (ตารางที่ 2.6) หรือจากงานวิจัยของ Brook และ Griffin (1989) ซึ่งพบว่าองค์ประกอบของน้ำตาลมอลโทเดกซ์ทรินจากแป้งข้าวมีความหลากหลาย แต่พบว่ามี DP 3, 5, 6 และ 7 ในปริมาณสูง



สรุปได้ว่าพันธุ์ข้าวเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินมีความหลากหลาย  
กัน แม้จะผลิตด้วยวิธีเดียวกัน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE ใกล้เคียงกัน