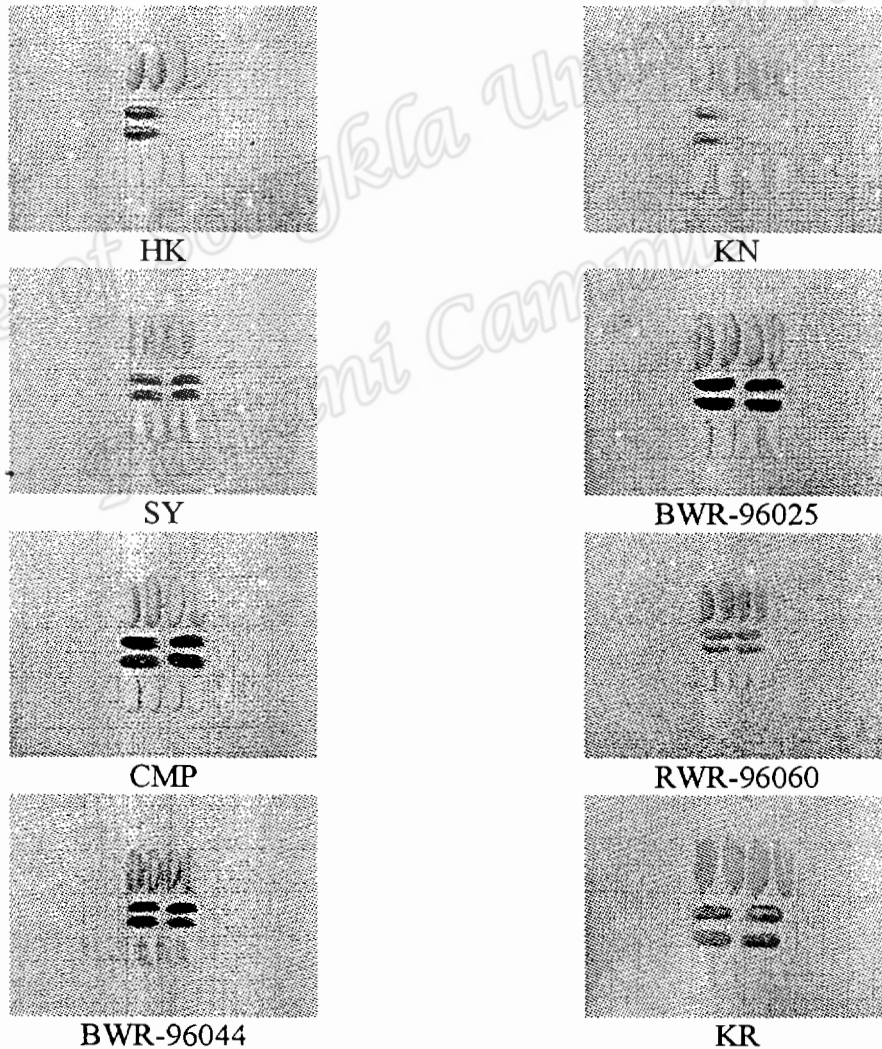


บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ศึกษาคุณภาพของข้าวพื้นเมืองมีสีที่พบในภาคใต้ของประเทศไทยจำนวน 8 พันธุ์ เป็นข้าวเจ้า 3 พันธุ์คือ HK, KN และ SY และข้าวเหนียว 5 พันธุ์คือ RWR-96060, BWR-96025, CMP, KR และ BWR-96044 (รูปที่ 6) โดยศึกษาคุณภาพทางกายภาพ คุณภาพทางเคมีและคุณค่าทางโภชนาการ คุณภาพในการหุงต้ม และการรับประทาน โดยผลการศึกษาได้แสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 6 ข้าวมีสีพันธุ์พื้นเมืองภาคใต้ในรูปของข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขัดขาว

4.1 คุณภาพทางกายภาพของเมล็ดข้าว

สมบัติทางกายภาพของข้าวเปลือก ข้าวกล้องและข้าวขัดขาว ได้แก่ สี น้ำหนัก และรูปร่างของเมล็ด โดยการเตรียมตัวอย่างข้าวกล้องและข้าวขัดขาวได้อธิบายไว้ในข้อที่ 3.3.1 สำหรับตัวอย่างข้าวซึ่งผ่านการขัดสีมีระดับการขัดสีอยู่ในช่วง 11.25-15.41 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 17) จัดเป็นระดับการขัดสีที่ดีพิเศษ ผลการทดลองพบว่าระดับการขัดสีของข้าวพันธุ์ HK, BWR-96025, CMP และ BWR-96044 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับข้าวพันธุ์ KN และ SY สำหรับข้าวพันธุ์ KR ไม่สามารถคำนวณค่าระดับการขัดสีได้ เพราะพบว่ามีเนื้อแป้งจำนวนมากถูกขัดออกไปกับรำและเกิดการแตกหักของเมล็ดสูง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะมีรูปร่างของเมล็ดยาวเรียว ทำให้เมล็ดแตกหักง่ายในระหว่างการขัดสี (เครื่อวัลย์, 2536) จึงไม่สามารถคำนวณระดับการขัดสีที่ถูกต้องได้ ผลการศึกษาคุณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขัดขาวเป็นดังต่อไปนี้

ตารางที่ 17 ระดับการขัดสีของตัวอย่างข้าวมีสีพันธุ์พื้นเมืองภาคใต้

	พันธุ์ข้าว	ระดับการขัดสี (%)
ข้าวเจ้า	HK	11.25±0.86 ^a
	SY	14.75±1.08 ^c
	KN	15.41±1.04 ^c
ข้าวเหนียว	RWR-96060	12.60±0.57 ^b
	BWR-96025	12.25±0.55 ^{ab}
	CMP	12.25±0.96 ^{ab}
	KR	nd
	BWR-96044	12.15±0.49 ^{ab}

ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ($p < 0.05$)

4.1.1 สีของเมล็ดข้าวเปลือก ข้าวกล้องและข้าวขัดขาว

สีของข้าวเป็นลักษณะประจำพันธุ์ เนื่องจากมียีนเฉพาะในการควบคุมรงควัตถุที่ให้สี และแตกต่างกันไปตามพันธุ์ข้าว (อรอนงค์, 2547) ผลการศึกษาสีของข้าวพื้นเมืองที่มีสีของภาคใต้ทั้งในรูปของข้าวเปลือก ข้าวกล้องและข้าวขัดขาว ดังแสดงในตารางที่ 18 ข้าวเปลือกของข้าวแต่ละพันธุ์มีค่าความสว่าง (L^*) อยู่ในช่วง 49.40-59.94 โดยที่ข้าวเปลือกพันธุ์ HK, KN, SY, CMP และ KR มีค่า L^* ไม่แตกต่างกัน เป็นกลุ่มข้าวที่มีสีเปลือกสว่างกว่าข้าวพันธุ์อื่นๆ ขณะที่พันธุ์ BWR-96025 RWR-96060 และ BWR-96044 มีค่า L^* น้อยลงมาตามลำดับ สำหรับค่าสีแดง (a^*) ของข้าวเปลือกอยู่ในช่วง 5.23-6.76 โดยที่ข้าวเปลือกพันธุ์ CMP มีค่า a^* น้อยที่สุด และข้าวเปลือกพันธุ์ KR มีค่า a^* สูงสุด ข้าวแต่ละพันธุ์มีค่า a^* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ผลวิเคราะห์ค่า b^* ของข้าวเปลือกพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 11.29-20.52 โดยที่ข้าวพันธุ์ BWR-96044 มีค่า b^* น้อยที่สุด คือ 11.29 และข้าวเปลือกพันธุ์ CMP มีค่า b^* เท่ากับ 19.68 ซึ่งสูงกว่าข้าวเปลือกพันธุ์ HK และ KN และไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับข้าวเปลือกพันธุ์ KR ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์และลักษณะสีที่ปรากฏของข้าวเปลือก สรุปได้ว่าข้าวเปลือกพันธุ์ BWR-96044 RWR-96060 และ BWR-96025 เป็นข้าวกลุ่มที่มีเปลือกสีน้ำตาล ขณะที่พันธุ์ KN, HK, CMP, KR และ SY มีสีเปลือกเป็นสีเหลืองอ่อน หรือ สีฟาง

ตารางที่ 18 สีของตัวอย่างข้าวมีสีที่พันธุ์พื้นเมืองภาคใต้

พันธุ์ข้าว	ข้าวเปลือก		ข้าวกล้อง		ข้าวขัดขาว				
	L*	a*	b*	L*	a*	b*			
HK	58.07±0.92 ^d	5.84±0.26 ^{bcd}	18.59±0.74 ^d	49.77±1.59 ^d	7.50±0.56 ^c	11.66±0.70 ^{de}	75.91±0.58 ^b	1.64±0.13 ^d	13.53±0.34 ^d
KN	58.00±0.78 ^d	5.95±0.19 ^{cd}	18.81±0.45 ^d	49.63±0.87 ^d	9.68±0.38 ^d	13.07±0.57 ^f	77.68±0.71 ^c	2.22±0.14 ^e	11.11±0.22 ^{bc}
SY	59.25±0.77 ^d	6.23±0.11 ^{de}	20.52±0.50 ^e	47.41±0.65 ^e	10.67±0.63 ^e	12.08±0.54 ^e	82.69±0.64 ^f	0.97±0.11 ^b	10.89±0.20 ^b
BWR-96025	54.70±0.81 ^e	5.47±0.16 ^{ab}	16.45±0.58 ^e	41.20±0.96 ^e	4.18±0.58 ^a	3.84±0.80 ^b	79.51±1.18 ^d	1.27±0.30 ^c	13.76±0.52 ^e
RWR-96060	51.77±0.49 ^b	6.56±0.19 ^{ef}	14.48±0.45 ^b	51.78±0.66 ^e	12.15±0.49 ^f	15.71±0.48 ^g	81.33±0.81 ^e	1.65±0.24 ^d	13.93±0.35 ^e
CMP	59.60±0.64 ^d	5.23±0.27 ^a	19.68±0.47 ^{de}	44.04±1.68 ^b	4.80±0.48 ^b	5.92±1.17 ^e	79.14±0.60 ^d	0.78±0.15 ^a	11.26±0.40 ^c
KR	59.94±9.06 ^d	6.76±1.61 ^f	19.18±4.53 ^d	51.44±1.27 ^e	11.00±0.97 ^e	11.44±1.04 ^d	81.21±0.65 ^e	2.43±0.20 ^f	10.90±0.28 ^b
BWR-96044	49.40±0.70 ^a	5.69±0.25 ^{bc}	11.29±0.65 ^a	40.82±1.04 ^a	3.84±0.74 ^a	3.30±0.84 ^a	72.05±1.56 ^e	2.19±0.18 ^e	7.43±0.38 ^a

ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 15 ซ้ำ

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ($p < 0.05$)

สำหรับสีของข้าวกล้องพบว่า มีค่า L^* , a^* และ b^* อยู่ในช่วง 40.82-51.44, 3.84-12.15 และ 3.30-15.71 ตามลำดับ ข้าวกล้องพันธุ์ BWR-96044 มีค่า L^* ต่ำสุดและไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับข้าวกล้องพันธุ์ BWR-96025 ส่วนข้าวกล้องพันธุ์ RWR-96060 มีค่า L^* สูงสุดคือ 51.78 ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับข้าวกล้องพันธุ์ KR ขณะที่ข้าวกล้องพันธุ์ BWR-96044 มีค่า a^* และ b^* น้อยที่สุดคือ 3.84 และ 3.30 ตามลำดับ และไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับข้าวกล้องพันธุ์ BWR-96025 และข้าวกล้องพันธุ์ RWR-96060 มีค่า a^* และ b^* สูงสุดซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับข้าวพันธุ์อื่นๆ จากผลการศึกษานี้สามารถแบ่งข้าวกล้องตามกลุ่มของสีได้เป็น 2 กลุ่มคือ สีม่วงแก่และสีน้ำตาลแดง ข้าวกล้องที่อยู่ในโทนสีม่วงแก่ประกอบด้วย ข้าวพันธุ์ BWR-96044 ซึ่งมีสีม่วงคล้ำสุด รองมาคือ ข้าวพันธุ์ BWR-96025 และ CMP ส่วนข้าวกล้องที่มีสีน้ำตาลแดงประกอบด้วย ข้าวพันธุ์ SY มีสีน้ำตาลแดงเข้มสุด รองมาคือข้าวพันธุ์ KR และ RWR-96060 ส่วนข้าวกล้อง HK และ KN เป็นข้าวกล้องที่มีสองสี คือเมล็ดกลุ่มหนึ่งเป็นสีเหลืองอ่อนและอีกกลุ่มเป็นสีน้ำตาลแดง ในข้าวพันธุ์เดียวกันสีของข้าวกล้อง (L^* , a^* และ b^*) แตกต่างจากสีของข้าวเปลือกอย่างมีนัยสำคัญ ปัจจัยที่ส่งผลให้สีของข้าวกล้องแตกต่างกันน่าจะเป็นรงควัตถุในเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวกล้อง ทำให้สีของข้าวกล้องต่างไปจากสีของข้าวเปลือก แอนโทไซยานินเป็นสารที่ให้สีได้หลากหลายคือ สีม่วง สีน้ำเงิน สีส้ม และสีแดง (Escribano-Bailon *et al.*, 2004) ซึ่งสีที่ต่างกันขึ้นอยู่กับโครงสร้าง และค่าความเป็นกรด-ด่าง ด้วยเหตุผลนี้ข้าวกล้องจึงมีสีที่ต่างกันไปตามแต่ละพันธุ์

ข้าวขัดขาวมีค่า L^* , a^* และ b^* อยู่ในช่วง 72.05-82.69, 0.78-2.43 และ 7.43-13.96 ตามลำดับ ข้าวขัดขาวพันธุ์ RWR-96060 และ ข้าวพันธุ์ CMP มีค่า L^* ที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ข้าวขัดขาวพันธุ์ KN และ BWR-96044 มีค่า a^* ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และข้าวขัดขาวพันธุ์ KN, SY, CMP และ KR มีค่า b^* ที่แตกต่างกันอย่างไม่เป็นนัยสำคัญ สีข้าวขัดขาว แตกต่างจากข้าวเปลือกและข้าวกล้องมาก เนื่องจากกระบวนการขัดสีจะกำจัดเยื่อหุ้มเมล็ดซึ่งจากการเตรียมข้าวขัดขาว (ตามข้อ 4.1) ปริมาณของรำถูกกำจัดออกไป 11.25-15.41 เปอร์เซ็นต์ มีผลให้ข้าวมีค่า L^* เพิ่มขึ้น และค่า a^* และ b^* ลดลง ระดับการขัดสีมีผลมากต่อสีของเมล็ดข้าว จากการศึกษาของ Lamberts *et al.* (2007) ได้ศึกษากระบวนการขัดสีต่อสีของเมล็ดข้าวพันธุ์ Puntal โดยให้ระดับการขัดสีอยู่ในช่วง 0-25 เปอร์เซ็นต์ ผลการศึกษาพบว่าระดับการขัดสีที่สูงถึง 15% จะส่งผลให้ค่า L^* ของเมล็ดข้าวสูงขึ้น แต่ค่า a^* และ b^* ลดลงซึ่งอธิบายได้ว่า รงควัตถุสีแดงและสีเหลืองลดน้อยลงเพราะได้ถูกขัดสีออกไป ในเชิงพาณิชย์ระดับการขัดสีมีผลต่อราคาของข้าว เพราะข้าวที่มีระดับการขัดสีสูงและมีความสว่างของเมล็ดมาก จะมีราคาสูง เนื่องจากเป็นที่ต้องการของผู้บริโภค

4.1.2 ขนาดและรูปร่างของเมล็ดข้าวเปลือก ข้าวกล้องและข้าวขัดขาว

ขนาด (ความกว้างและความยาวของเมล็ด) และรูปร่างของเมล็ดข้าว เป็นปัจจัยสำคัญที่เป็นเกณฑ์ในการซื้อขายข้าวของไทย ข้าวที่มีเมล็ดยาวเรียวย่อมมีราคาซื้อขายสูงกว่าข้าวเมล็ดสั้น (อรอนงค์, 2546) (อังคณา และเครือวัลย์, 2539) ขนาด ความกว้าง ความยาว และรูปร่างของเมล็ดข้าวเปลือก ข้าวกล้องและข้าวขัดขาวแสดงในตารางที่ 19 สำหรับข้าวเปลือกพบว่าความกว้างของเมล็ดโดยส่วนใหญ่จะไม่แตกต่างกัน ซึ่งจะอยู่ในช่วง 0.20-0.35 เซนติเมตร ยกเว้นเมล็ดข้าวเปลือกพันธุ์ BWR-96044 ซึ่งมีความกว้างมากที่สุดคือ 0.56 เซนติเมตร และแตกต่างจากข้าวพันธุ์อื่นอย่างมีนัยสำคัญ เมล็ดข้าวเปลือกมีความยาวอยู่ในช่วง 0.87-1.03 เซนติเมตร ความยาวของข้าวเปลือกพันธุ์ HK และ KN มีค่าน้อยที่สุดคือ (0.87 และ 0.88 เซนติเมตรตามลำดับ) และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับข้าวพันธุ์อื่น ข้าวเปลือกพันธุ์ KR มีความยาวมากที่สุดคือ 1.03 เซนติเมตร และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับข้าวพันธุ์อื่นๆ การศึกษารูปร่างของเมล็ดข้าวเปลือกทำได้โดยพิจารณาจากอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง พบว่าข้าวเปลือกส่วนมากมีรูปร่างเมล็ดเรียวยาว ยกเว้นพันธุ์ CMP KR และ BWR-96044 ที่มีรูปร่างเมล็ดขนาดปานกลาง

สำหรับข้าวกล้อง (ตารางที่ 20) พบว่าความกว้างของข้าวพันธุ์ BWR-96025 และ CMP มีค่าเท่ากันคือ 0.69 เซนติเมตร ส่วนความยาวของเมล็ดจะอยู่ในช่วง 0.62-0.75 เซนติเมตร ข้าวกล้อง CMP และ BWR-96025 มีความยาวของเมล็ดไม่แตกต่างกัน โดยมีความยาวของเมล็ดเท่ากับ 0.69 และ 0.69 เซนติเมตรตามลำดับ รูปร่างของเมล็ดข้าวกล้องส่วนใหญ่มีลักษณะเมล็ดขนาดปานกลางยกเว้นข้าวพันธุ์ SY ที่มีรูปร่างเรียวยาว จากการทดลองพบว่าหลังกะเทาะเปลือกแล้วข้าวกล้องมีความยาวและความกว้างน้อยกว่าข้าวเปลือก เนื่องจากความยาวและความกว้างของเมล็ดข้าวกล้องจะไม่รวมส่วนที่เป็นเปลือกข้าว

ตารางที่ 19 ความยาว ความกว้าง อัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง และรูปร่างของตัวอย่าง

ข้าวเปลือก

พันธุ์ข้าว	ความยาว (ซม.)	ความกว้าง (ซม.)	ความยาว: ความกว้าง	รูปร่าง*	
ข้าวเจ้า	HK	0.87±0.02 ^a	0.25±0.01 ^a	3.47±0.22 ^c	เรียวยาว
	KN	0.88±0.01 ^a	0.25±0.01 ^a	3.43±0.13 ^c	เรียวยาว
	SY	0.96±0.01 ^{bc}	0.20±0.00 ^a	4.66±0.18 ^c	เรียวยาว
ข้าวเหนียว	RWR-96060	0.98±0.02 ^{cd}	0.25±0.02 ^a	3.85±0.36 ^d	เรียวยาว
	BWR-96025	0.99±0.03 ^{de}	0.28±0.00 ^{ab}	3.54±0.20 ^{cd}	เรียวยาว
	CMP	0.94±0.03 ^b	0.35±0.01 ^{ab}	2.69±0.13 ^a	ปานกลาง
	KR	1.03±0.02 ^f	0.33±0.00 ^{ab}	3.06±0.07 ^b	ปานกลาง
	BWR-96044	1.00±0.02 ^e	0.56±0.85 ^b	3.07±0.96 ^b	ปานกลาง

*รูปร่างของเมล็ดข้าววิเคราะห์จากอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (ตารางที่ 2)

ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 10 ซ้ำ

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ($p < 0.05$)

ตารางที่ 20 ความยาว ความกว้าง อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างและรูปร่างของข้าวกล้อง

พันธุ์ข้าว	ความยาว (ซม.)	ความกว้าง (ซม.)	ความยาว: ความกว้าง	รูปร่าง*	
ข้าวเจ้า	HK	0.63±0.03 ^{ab}	0.22±0.01 ^b	2.85±0.24 ^{bc}	ปานกลาง
	KN	0.66±0.03 ^{bc}	0.22±0.01 ^b	2.96±0.18 ^{bc}	ปานกลาง
	SY	0.62±0.04 ^a	0.17±0.01 ^a	3.58±0.40 ^d	เรียวยาว
ข้าวเหนียว	RWR-96060	0.65±0.01 ^{ab}	0.23±0.01 ^c	2.76±0.11 ^{ab}	ปานกลาง
	BWR-96025	0.69±0.02 ^d	0.22±0.01 ^{bc}	3.05±0.11 ^c	ปานกลาง
	CMP	0.69±0.02 ^d	0.27±0.02 ^d	2.58±0.23 ^a	ปานกลาง
	KR	0.75±0.02 ^c	0.27±0.00 ^d	2.75±0.14 ^{ab}	ปานกลาง
	BWR-96044	0.68±0.03 ^{cd}	0.23±0.01 ^{bc}	2.94±0.20 ^{bc}	ปานกลาง

*รูปร่างของเมล็ดข้าววิเคราะห์จากอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (ตารางที่ 2)

ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 10 ซ้ำ

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ($p < 0.05$)

ตารางที่ 21 ความยาว ความกว้าง อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างและรูปร่างของข้าวขัดขาว

พันธุ์ข้าว	ความยาว (ซม.)	ความกว้าง (ซม.)	ความยาว: ความกว้าง	รูปร่าง*	
ข้าวเจ้า	HK	0.59±0.02 ^a	0.21±0.00 ^b	2.82±0.07 ^a	ปานกลาง
	KN	0.62±0.01 ^b	0.20±0.00 ^b	3.01±0.08 ^b	เรียวยาว
	SY	0.60±0.02 ^a	0.17±0.00 ^a	3.53±0.15 ^c	เรียวยาว
ข้าวเหนียว	RWR-96060	0.63±0.02 ^{bc}	0.22±0.01 ^c	2.78±0.16 ^a	ปานกลาง
	BWR-96025	0.65±0.02 ^c	0.21±0.00 ^b	3.10±0.16 ^b	เรียวยาว
	CMP	0.68±0.01 ^d	0.24±0.00 ^d	2.76±0.13 ^a	ปานกลาง
	KR	0.66±0.02 ^c	0.23±0.01 ^c	2.78±0.15 ^a	ปานกลาง
	BWR-96044	0.70±0.02 ^e	0.22±0.00 ^c	3.12±0.14 ^b	เรียวยาว

*รูปร่างของเมล็ดข้าววิเคราะห์จากอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (ตารางที่ 2)

ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 10 ซ้ำ

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ($p < 0.05$)

ข้าวขัดขาว (ตารางที่ 21) มีความกว้างของเมล็ดอยู่ในช่วง 0.17-0.24 เซนติเมตร ซึ่งข้าวพันธุ์ HK KN และ BWR-96025 มีความกว้างของเมล็ดไม่แตกต่างกัน สำหรับความยาวของเมล็ดข้าวขัดขาวอยู่ในช่วง 0.59-0.70 เซนติเมตร และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ข้าวขัดขาวพันธุ์ KR มีความยาวเมล็ดไม่แตกต่างกับข้าวขัดขาวพันธุ์ BWR-96025 โดยมีความยาวที่เท่ากันคือ 0.65 เซนติเมตร รูปร่างของเมล็ดข้าวขัดขาวมี 2 แบบคือ ข้าวขัดขาวเมล็ดยาว ประกอบด้วยข้าวพันธุ์ KN, SY, BWR-96025 และ BWR-96044 และข้าวขัดขาวเมล็ดยาวปานกลาง ประกอบด้วยข้าวพันธุ์ HK, RWR-96060, CMP และ KR ข้าวขัดขาวมีความยาวและความกว้างน้อยกว่าข้าวเปลือกและข้าวกล้อง เนื่องจากข้าวขัดขาวผ่านการกะเทาะเพื่อเอาเปลือกออก และการขัดสียังเป็นสาเหตุที่ทำให้เมล็ดข้าวมีขนาดเล็กลง เนื่องจากการขัดจนเกินไปจะทำให้เมล็ดข้าวแตกหักเสียหาย (Lamberts *et al.*, 2007)

4.1.3 น้ำหนักของเมล็ดข้าวเปลือก ข้าวกล้องและข้าวขัดขาว

น้ำหนักเมล็ดเป็นคุณภาพทางกายภาพที่เป็นลักษณะประจำพันธุ์ เนื่องจากควบคุมโดยพันธุกรรม และมีความคงที่มากที่สุด ผลการศึกษาพบว่า น้ำหนักเมล็ดข้าวเปลือก>ข้าวกล้อง>ข้าวขัดขาว โดยอยู่ในช่วง 2.85-7.16, 2.73-6.02 และ 1.69-3.30 กรัม/100 เมล็ดตามลำดับ (ตารางที่ 22) เมล็ดข้าวเปลือกพันธุ์ SY น้ำหนักน้อยที่สุดในขณะที่ข้าวเปลือก BWR-96044 มีน้ำหนักสูงสุด และแตกต่างกันมีนัยสำคัญกับข้าวพันธุ์อื่นๆ ส่วนข้าวเปลือกพันธุ์ KN RWR-96060 และ BWR-96025 มีน้ำหนักของเมล็ดไม่แตกต่างกัน เช่นเดียวกับข้าวเปลือกพันธุ์ CMP มีน้ำหนักเมล็ดไม่แตกต่างกันกับข้าวเปลือกพันธุ์ KR (5.31 และ 5.16 กรัม/100 เมล็ดตามลำดับ) เมล็ดข้าวเปลือกมีน้ำหนักมากกว่าข้าวกล้อง และข้าวขัดขาว เพราะเป็นน้ำหนักที่รวมแกลบและรำไว้ด้วยกัน

น้ำหนักของเมล็ดข้าวกล้อง SY มีค่าน้อยที่สุด และมีน้ำหนักไม่แตกต่างกับเมล็ดข้าวกล้อง KN (2.75 และ 2.73 กรัม/100 เมล็ดตามลำดับ) ส่วนเมล็ดข้าวกล้อง RWR-96060 มีน้ำหนักของเมล็ดไม่แตกต่างกับเมล็ดข้าวกล้อง HK (3.45 และ 3.37 กรัม/100 เมล็ดตามลำดับ) ดังตารางที่ 23 น้ำหนักเมล็ดข้าวกล้องจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักเมล็ดข้าวเปลือก เพราะข้าวกล้องได้ผ่านการกะเทาะเอาเปลือกออก จึงทำให้น้ำหนักเมล็ดลดลงไป

สำหรับน้ำหนักเมล็ดข้าวขัดขาวอยู่ในช่วง 1.69-3.30 กรัม/100 เมล็ด และเมล็ดข้าวขัดขาว CMP มีน้ำหนักของเมล็ดไม่แตกต่างกับข้าวขัดขาว BWR-96025 (3.25 และ 3.30 กรัม/100 เมล็ดตามลำดับ) ดังตารางที่ 24 ข้าวขัดขาวมีน้ำหนักของเมล็ดน้อยกว่าข้าวเปลือกและข้าวกล้อง เพราะได้ผ่านการกะเทาะและขัดสีซึ่งได้กำจัดเอาเปลือกและเยื่อหุ้มเมล็ด ระดับการขัดสีมีผลต่อน้ำหนักของเมล็ดข้าว ดังที่ได้ว่าข้าว SY และ KN มีระดับการขัดสีที่สูง ทำให้มีน้ำหนักของเมล็ดข้าวขัดขาวน้อย เมื่อเทียบกับข้าวพันธุ์อื่นๆ ความชื้นมีผลต่อน้ำหนักของเมล็ดข้าว ดังนั้นในการคำนวณจึงคิดที่ระดับความชื้น 14 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองพบว่าข้าวเหนียวมีน้ำหนักของเมล็ดสูงกว่าข้าวเจ้า ข้าวพันธุ์ KN มีน้ำหนักข้าวกล้องและข้าวขัดขาวน้อยที่สุด ข้าวพันธุ์ BWR-96044 มีน้ำหนักเมล็ดข้าวเปลือกและข้าวกล้องมากที่สุด และข้าวขัดขาว BWR-96025 มีน้ำหนักเมล็ดมากที่สุด

ตารางที่ 22 น้ำหนักของเมล็ดข้าวเปลือก

	พันธุ์ข้าว	น้ำหนักเมล็ด (g/100 เมล็ด)*
ข้าวเจ้า	HK	3.53±0.15 ^b
	KN	4.34±0.17 ^c
	SY	2.85±0.23 ^a
ข้าวเหนียว	RWR-96060	4.19±0.09 ^c
	BWR-96025	4.44±0.32 ^c
	CMP	5.31±0.31 ^d
	KR	5.16±0.36 ^d
	BWR-96044	7.16±0.37 ^c

*น้ำหนักเมล็ดคิดที่ความชื้น 14%

ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ($p < 0.05$)

ตารางที่ 23 น้ำหนักของเมล็ดข้าวกล้อง

	พันธุ์ข้าว	น้ำหนักเมล็ด (g/100 เมล็ด)*
ข้าวเจ้า	HK	3.37±0.16 ^b
	KN	2.73±0.06 ^a
	SY	2.75±0.09 ^a
ข้าวเหนียว	RWR-96060	3.45±0.10 ^b
	BWR-96025	4.40±0.12 ^d
	CMP	3.92±0.15 ^c
	KR	4.94±0.20 ^c
	BWR-96044	6.02±0.07 ^f

*น้ำหนักเมล็ดคิดที่ความชื้น 14%

ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ($p < 0.05$)

ตารางที่ 24 น้ำหนักของเมล็ดข้าวขัดขาว

	พันธุ์ข้าว	น้ำหนักเมล็ด (g/100 เมล็ด)*
ข้าวเจ้า	HK	2.47±0.07 ^c
	KN	1.69±0.05 ^a
	SY	1.98±0.09 ^b
ข้าวเหนียว	RWR-96060	2.89±0.05 ^c
	BWR-96025	3.30±0.09 ^f
	CMP	3.25±0.06 ^f
	KR	2.60±0.02 ^d
	BWR-96044	2.85±0.01 ^e

*น้ำหนักเมล็ดคิดที่ความชื้น 14%

ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ($p < 0.05$)

Prince of Songkhla University
Pattani Campus

4.2 คุณภาพทางเคมีและคุณค่าทางโภชนาการของข้าวกล้องและข้าวขัดขาว

องค์ประกอบทางเคมี และคุณค่าทางโภชนาการของข้าวกล้องและข้าวขัดขาว ได้แก่ ความชื้น ไขมัน โปรตีน เยื่อใย เถ้า ปริมาณเหล็ก ปริมาณวิตามินอีและวิตามินบีชนิดต่างๆ ปริมาณของสารโพลีฟีนอล และความสามารถในการขจัดอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS ของสารโพลีฟีนอล มีผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.2.1 คุณภาพทางเคมี

ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องและข้าวขัดขาว แสดงดังตารางที่ 25 ข้าวกล้อง CMP และ BWR-96044 มีความชื้นต่ำและไม่แตกต่างกันทางสถิติ สำหรับปริมาณโปรตีน พบว่าข้าวกล้องทุกพันธุ์มีโปรตีนในช่วง 6.63-8.46 เปอร์เซ็นต์ ข้าวกล้องพันธุ์ CMP มีปริมาณโปรตีนไม่แตกต่างกับข้าวกล้องพันธุ์ BWR-96025 และข้าวพันธุ์ SY RWR-96060 และ BWR-96044 มีปริมาณโปรตีนไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ จากการศึกษาพบว่าปริมาณโปรตีนข้าวกล้องมีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของ Wang and Wang (2004) ที่พบว่าแป้งข้าวกล้องมีโปรตีน 7.7 เปอร์เซ็นต์ และ Hamaker and Griffin (1990) ซึ่งพบว่าแป้งข้าวกล้องมีปริมาณโปรตีน 7 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Teo *et al.* (2000) พบว่าแป้งข้าวมีโปรตีน 8 เปอร์เซ็นต์ โปรตีนในข้าวจะอยู่ในส่วนของรำ ซึ่งเป็นส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ด และบางส่วนพบในเนื้อเมล็ด ส่งผลให้ข้าวกล้องซึ่งเป็นข้าวที่ไม่ได้ผ่านการขัดสีเอารำออกมีปริมาณโปรตีนมากกว่าข้าวขัดขาว ดังนั้นการบริโภคข้าวกล้องจึงทำให้ผู้บริโภคได้รับปริมาณโปรตีนมากกว่าข้าวขัด และอีกสาเหตุที่ทำให้ปริมาณโปรตีนในข้าวกล้องมีค่าต่างกันคือพันธุ์ข้าว และสภาวะในการเพาะปลูก (สุพิศา, 2547)

ตารางที่ 25 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้อง

พันธุ์ข้าว	ความชื้น (% wb.)	โปรตีน (% db.)	ไขมัน (% db.)	คาร์โบไฮเดรต* (% db.)	เยื่อใย (% db.)	เถ้า (% db.)
ข้าวเจ้า						
HK	6.76±0.26 ^b	6.96±0.10 ^b	1.47±0.09 ^{ab}	83.35±0.40 ^b	0.28±0.00 ^b	1.44±0.10 ^{ab}
KN	8.65±0.14 ^f	6.63±0.11 ^a	2.17±0.04 ^c	80.08±0.40 ^d	0.35±0.05 ^c	1.64±0.13 ^{ab}
SY	7.18±0.22 ^c	8.06±0.03 ^d	1.65±0.56 ^{ab}	80.94±0.30 ^a	0.26±0.01 ^b	2.15±0.05 ^c
ข้าวเหนียว						
RWR-96060	8.19±0.30 ^e	8.18±0.12 ^d	1.58±0.04 ^{ab}	80.25±0.18 ^b	0.35±0.05 ^c	1.78±0.35 ^b
BWR-96025	7.60±0.21 ^d	8.44±0.03 ^a	1.93±0.39 ^{bc}	78.95±0.36 ^{cd}	0.26±0.01 ^b	1.52±0.12 ^{ab}
CMP	6.08±0.23 ^a	8.46±0.17 ^c	1.50±0.04 ^{ab}	82.35±0.35 ^d	0.16±0.05 ^a	1.58±0.20 ^{ab}
KR	6.83±0.26 ^{bc}	7.69±0.09 ^c	1.44±0.11 ^a	82.63±0.11 ^{cd}	0.28±0.01 ^b	1.38±0.10 ^a
BWR-96044	5.96±0.06 ^a	8.23±0.17 ^d	1.67±0.09 ^{ab}	82.76±0.23 ^{bc}	0.29±0.00 ^b	1.35±0.07 ^a

ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ($p < 0.05$)

* จากวิธีการคำนวณ

ตารางที่ 26 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวขัดขาว

พันธุ์ข้าว	ความชื้น (% wb.)	โปรตีน (% db.)	ไขมัน (% db.)	คาร์โบไฮเดรต (% db.)	เยื่อใย (% db.)	เถ้า (% db.)
HK	8.37±0.19 ^c	6.46±0.04 ^b	0.39±0.03 ^c	84.29±0.29 ^e	Tr	0.47±0.11 ^{ab}
ข้าวเจ้า KN	12.29±0.36 ^c	5.38±0.08 ^a	0.26±0.05 ^a	81.68±0.15 ^a	Tr	0.36±0.12 ^a
SY	8.74±0.22 ^c	7.89±0.16 ^f	0.38±0.09 ^c	82.43±0.36 ^b	Tr	0.54±0.05 ^b
RWR-96060	7.96±0.23 ^b	7.26±0.07 ^d	0.36±0.03 ^{bc}	83.84±0.09 ^d	Tr	0.56±0.05 ^b
BWR-96025	7.26±0.03 ^a	7.17±0.06 ^d	0.27±0.03 ^{ab}	84.92±0.15 ^f	Tr	0.37±0.11 ^a
ข้าวเหนียว CMP	8.64±0.21 ^c	7.55±0.07 ^e	0.23±0.02 ^a	82.94±0.29 ^c	Tr	0.62±0.04 ^b
KR	9.88±0.21 ^d	6.77±0.03 ^c	0.28±0.04 ^{ab}	82.59±0.22 ^{bc}	Tr	0.46±0.04 ^{ab}
BWR-96044	9.87±0.01 ^d	6.86±0.07 ^c	0.32±0.01 ^{abc}	82.36±0.13 ^b	Tr	0.57±0.05 ^b

ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการศึกษาจำนวน 3 ซ้ำ

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ($p < 0.05$)

Tr หมายถึง จำนวนน้อยมาก

สำหรับปริมาณไขมันของข้าวกล้องอยู่ในช่วง 1.44-2.17 เปอร์เซ็นต์ โดยพบว่าปริมาณไขมันของข้าวพันธุ์ HK, SY, CMP, RWR-96060 และ BWR-96044 มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยข้าวพันธุ์ KN มีปริมาณไขมันมากที่สุดคือ 2.17 เปอร์เซ็นต์ และข้าว KR มีปริมาณไขมันน้อยที่สุดคือ 1.44 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษาของ Heinemann *et al.* (2005) พบว่าข้าวกล้องมีไขมันเท่ากับ 2.65 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเยื่อใยของข้าวกล้องทั้ง 8 พันธุ์อยู่ในช่วง 0.16-0.35 เปอร์เซ็นต์ โดยข้าวพันธุ์ BWR-96044, HK, KR, SY และ BWR-96025 มีปริมาณเยื่อใยที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ข้าวกล้อง KN มีปริมาณเยื่อใยมากที่สุดและไม่แตกต่างจากข้าวกล้อง RWR-96060 ผลการทดลองที่ได้มีความคล้ายคลึงกับการศึกษาของ รุ่งนภา และคณะ (2546) ซึ่งพบว่าข้าวกล้องที่ใช้ศึกษามีเยื่อใยอยู่ในช่วง 0.25-0.63 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ Juliano (1972) พบว่าข้าวกล้องมีเยื่อใยประมาณ 0.6-1.0 เปอร์เซ็นต์ ข้าวกล้องมีปริมาณเยื่อใยที่สูงกว่าข้าวขัดขาว (กรมการข้าว, 2550) เนื่องจากข้าวกล้องมีส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ดติดอยู่ ซึ่งเป็นแหล่งของเยื่อใยที่อยู่ในรูปของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส สำหรับปริมาณเถ้าพบอยู่ในช่วง 1.35-2.15 เปอร์เซ็นต์ ข้าวพันธุ์ SY, RWR-96060, CMP และ BWR-96044 มีปริมาณเถ้าไม่แตกต่างกัน ข้าวกล้อง BWR-96044 และ KR มีปริมาณเถ้าน้อยมาก (1.35 และ 1.38 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ) ส่วนข้าวพันธุ์ SY มีปริมาณเถ้าสูงสุดคือ 2.15 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเถ้าที่วิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกับการศึกษาของ สุพิศา (2547) พบว่าข้าวกล้องที่มีรวงควัดดู มีปริมาณเถ้าอยู่ในช่วง 1.25-2.03 เปอร์เซ็นต์ และจากการศึกษาของ ศศิธร (2547) พบว่าข้าวกล้องพื้นเมืองของภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีปริมาณเถ้าอยู่ในช่วง 1.34-1.63 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเถ้าเป็นตัวบ่งชี้ปริมาณเกลือแร่ที่มีในข้าว ปริมาณเถ้าจะพบมากในเยื่อหุ้มเมล็ดถึง 61 เปอร์เซ็นต์ของเถ้าที่พบทั้งหมดในข้าว (Lambert *et al.*, 2007) ดังนั้นข้าวกล้องจึงมีปริมาณเถ้าสูงกว่าข้าวขัดขาว ส่วนปริมาณคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบที่พบมากที่สุด ซึ่งข้าวกล้องมีคาร์โบไฮเดรต (จากการคำนวณ) อยู่ในช่วง 78.95-83.35 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของ รุ่งนภา และคณะ (2546)

สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของข้าวขัดขาวทุกพันธุ์มีค่าต่ำกว่าข้าวกล้อง โดยพบว่ามีโปรตีนอยู่ในช่วง 5.38-7.89 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณไขมันอยู่ในช่วง 0.23-0.39 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเถ้าอยู่ในช่วง 0.36-0.62 เปอร์เซ็นต์ ส่วนปริมาณเถ้าพบในปริมาณน้อยมาก Lamberts *et al.* (2007) กล่าวว่า การขัดสีเป็นการกำจัดเอาเยื่อหุ้มเมล็ดที่อุดมไปด้วยโปรตีน ไขมัน เยื่อใยและเถ้า เพราะองค์ประกอบเหล่านี้พบมากบริเวณคัพและเยื่อหุ้มเมล็ดชั้นนอก (Mohapatra and Bal, 2007; Roy *et al.*, 2008) ดังนั้นการขัดสีเมล็ดข้าว ทำให้คุณค่าทางโภชนาการลดลง จากการศึกษาพบว่าที่ระดับการขัดสีมากกว่า 9 เปอร์เซ็นต์ สามารถกำจัดโปรตีนบางส่วนที่พบในเยื่อหุ้มเมล็ดออกไปได้ เนื่องจากโปรตีนส่วนมากจะพบในเอนโดสเปิร์มชั้นใน ดังนั้นข้าวที่มีระดับการขัดสีสูงๆ

เช่น HK จึงมีโปรตีนต่ำ แต่ข้าว SY แม้ว่ามีระดับการขัดสีสูงแต่ก็พบปริมาณโปรตีนที่สูงเช่นกัน อาจเป็นไปได้ว่าข้าว SY มีโปรตีนที่อยู่ในเอนโดสเปิร์มชั้นในสูงกว่าข้าวพันธุ์อื่นๆ ข้าวขัดขาวมีคาร์โบไฮเดรตอยู่ในช่วง 81.68-84.92 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีปริมาณที่สูงกว่าข้าวกล้อง เพราะได้ขัดสีเอาเยื่อหุ้มเมล็ดออกไปทำให้มีสัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตที่ได้จากการคำนวณสูงขึ้น ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของ รุ่งนภา และคณะ (2546)

4.2.2 ปริมาณวิตามินในข้าวกล้องและข้าวขัดขาว

ผลการวิเคราะห์วิตามินในข้าวกล้องและข้าวขัดขาวพบว่า ทั้งข้าวกล้องและข้าวขัดขาวพบวิตามินบีหนึ่งและวิตามินอี โดยพบในตัวอย่างข้าวกล้องอยู่ในช่วง 0.16-2.04 และ 0-6.51 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่างตามลำดับ พบวิตามินบีหนึ่งในข้าวขัดขาว 0-0.40 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และไม่พบวิตามินอีในข้าวขัดขาว เป็นที่น่าสังเกตว่าข้าว CMP มีปริมาณวิตามินทั้งสองชนิดมากที่สุดและปริมาณวิตามินบีหนึ่งที่วิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกับการศึกษาของ Xia *et al.* (2002) ที่พบว่าข้าวสีดำนี้อามีวิตามินบีหนึ่งเท่ากับ 2.3 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และ Deepa *et al.* (2008) พบว่าข้าวกล้องมีวิตามินบีหนึ่งในช่วง 0.40-0.52 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ส่วนปริมาณวิตามินอีที่วิเคราะห์ได้มีความใกล้เคียงกับการศึกษาของ Aguilar-Garcia *et al.* (2007) พบว่าข้าวกล้องมีวิตามินอีในช่วง 7.83-8.51 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง จากการทดลองพบว่าข้าวกล้องมีปริมาณวิตามินบีหนึ่งและวิตามินอีสูงกว่าข้าวขัดขาว เพราะการขัดสีจะกำจัดเอาเยื่อหุ้มเมล็ดซึ่งอุดมไปด้วยวิตามินออกไป นอกจากนี้ความแตกต่างของพันธุ์ข้าว และสภาวะแวดล้อมในการเพาะปลูก ยังส่งผลให้ปริมาณวิตามินที่พบต่างกันด้วย (Deepa *et al.*, 2008)

ตารางที่ 27 ปริมาณวิตามินบีหนึ่งและวิตามินอีของตัวอย่างข้าวมีสีในรูปข้าวกล้องและข้าวขัดขาว

พันธุ์ข้าว	วิตามินบีหนึ่ง (mg/100g)		วิตามินอี (mg/100g)		
	ข้าวกล้อง	ข้าวขัดขาว	ข้าวกล้อง	ข้าวขัดขาว	
ข้าวเจ้า	HK	0.98	0.40	1.66	nd
	KN	0.16	nd	3.85	nd
	SY	1.09	0.33	2.78	nd
ข้าวเหนียว	RWR-96060	0.26	0.22	5.35	nd
	BWR-96025	0.06	nd	nd	nd
	CMP	2.04	0.31	6.51	nd
	KR	1.19	0.08	1.35	nd
	BWR-96044	0.28	0.01	5.71	nd

วิเคราะห์โดยภาควิชาเทคโนโลยีเกษตร มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

nd หมายถึงไม่สามารถตรวจพบ

4.2.3 ปริมาณเหล็กในข้าวกล้องและข้าวขัดขาว

วิเคราะห์ปริมาณธาตุเหล็กด้วยเทคนิค AAS โดยวิธีการดังกล่าวมีขีดความสามารถในการวิเคราะห์ต่ำสุดคือ 0.039 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ผลการศึกษาพบว่า ข้าวกล้องมีธาตุเหล็กอยู่ในช่วง 0.91-1.66 มิลลิกรัม/100 กรัมตัวอย่าง (ตารางที่ 28) ข้าว BWR-96044 มีธาตุเหล็กสูงที่สุดรองลงมาคือ BWR-96025, KR, CMP, KN, SY, HK และ RWR-96060 สำหรับข้าวขัดขาวมีปริมาณธาตุเหล็กอยู่ในช่วง 0.30-0.84 มิลลิกรัม/100 กรัมตัวอย่างและในข้าวพันธุ์เดียวกันมีค่าน้อยกว่าข้าวกล้องอย่างมีนัยสำคัญ จากการศึกษาของ ชนากานต์ และคณะ (2550) พบว่าพันธุ์ข้าวที่ปลูกบนพื้นที่ราบสูงของประเทศไทยคือ พันธุ์จะแนะแนะ มีธาตุเหล็กเท่ากับ 1.71 มิลลิกรัม/100 กรัมตัวอย่าง สุขจิตต์ และคณะ (2549) พบว่าข้าวมีที่มีรงควัตถุที่พบในประเทศไทยมีปริมาณธาตุเหล็กอยู่ไม่เกิน 2.50 มิลลิกรัม/100 กรัมตัวอย่าง นอกจากนี้ Hemalatha *et al.* (2007) พบว่าข้าวมีปริมาณของเหล็กเท่ากับ 1.32 มิลลิกรัม/100 กรัมตัวอย่าง ขณะที่ Heinemann *et al.* (2005) พบว่าข้าวขัดขาวมีปริมาณธาตุเหล็กอยู่ในช่วง 0.40-0.29 มิลลิกรัม/100 กรัมตัวอย่าง ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการศึกษาในการศึกษาปริมาณธาตุเหล็กในข้าวไทยโดยชนากานต์ และคณะ (2550) พบว่าปริมาณเหล็กในข้าวขัดขาว 4 พันธุ์คือ IR68144 (ข้าวเจ้า) จะแนะแนะ (ข้าวเหนียว) ข้าวดอกมะลิ 105 (ข้าวเจ้า) และเหนียวอุบล2 (ข้าวเหนียว) มีค่าเท่ากับ 0.92, 0.71, 0.51 และ 0.83 มิลลิกรัม/100 กรัมตัวอย่าง

จากการศึกษานี้พบว่าปริมาณธาตุเหล็กมีความสัมพันธ์กับสีของเมล็ด กล่าวคือเมื่อเมล็ดมีสีคล้ำมากขึ้นจะมีธาตุเหล็กสูงขึ้น โดยมีความสัมพันธ์กับค่า L^* a^* และ b^* ดังตารางภาคผนวกที่ 4 ($r = -0.646$ -0.654 และ -0.791 ตามลำดับ) ผลการทดลองคล้ายคลึงกับการศึกษาของ Meng *et al.* (2005) พบว่าข้าวที่มีสีดำจะมีปริมาณธาตุเหล็กสูงกว่าข้าวที่มีสีแดงและสีขาว และ Qui *et al.* (1993) พบว่าข้าวกลุ่มจาปอนิกาที่มีรวงควดสีสีแดง มีปริมาณธาตุเหล็กสูงกว่าข้าวในกลุ่มอินดิกาที่ไม่มียรวงควด การขัดสีทำให้ปริมาณธาตุเหล็กลดลง เมื่อระดับการขัดสีสูงขึ้น จึงมีผลต่อปริมาณของธาตุเหล็ก สังเกตได้จากข้าวกล้อง KN และ SY มีระดับการขัดสีที่สูงกว่าข้าวพันธุ์อื่นๆ ทำให้มีปริมาณเหล็กเหลือในเมล็ดต่ำ เพราะปริมาณของธาตุเหล็กภายในเมล็ดจะมีค่าน้อยกว่าตรงผิวนอกของเมล็ด พบว่าที่เชื่อมั้เมล็ดมีแร่ธาตุประมาณ 61 เปอร์เซ็นต์ แต่ในเนื้อเมล็ดมีเพียง 23.7 เปอร์เซ็นต์ (Itani *et al.*, 2002)

ตารางที่ 28 ปริมาณธาตุเหล็กในตัวอย่างข้าวมีสีในรูปแบบของข้าวกล้องและข้าวขัดขาว

พันธุ์ข้าว	ธาตุเหล็ก (mg/ 100 g sample)	
	ข้าวกล้อง	ข้าวขัดขาว
ข้าวเจ้า	HK	1.16±0.03 ^b
	KN	1.26±0.03 ^{cd}
	SY	1.21±0.04 ^{bc}
ข้าวเหนียว	RWR-96060	0.91±0.04 ^a
	BWR-96025	1.48±0.04 ^e
	CMP	1.31±0.03 ^d
	KR	1.46±0.03 ^e
	BWR-96044	1.66±0.03 ^f

ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ($p < 0.05$)

4.2.4 ปริมาณโพลิฟีนอลในข้าวกล้อง

โพลิฟีนอลเป็นสารที่พบในสารธรรมชาติกลุ่มใหญ่ เรียกตามความสามารถในการต้านออกซิเดชันว่าฟีนอลิกแอนติออกซิแดนซ์ ซึ่งมีความสามารถในการต้านออกซิเดชันสูงกว่าวิตามินซีและวิตามินอีหลายเท่า โพลิฟีนอลพบมากในองุ่น ผลไม้ตระกูลเบอร์รี่ และแม้กระทั่งข้าวที่มีรงควัตถุ (Escribano-Bailón *et al.*, 2004) สำหรับการศึกษานี้ได้วิเคราะห์ปริมาณโพลิฟีนอลในข้าวมีสีที่พบในภาคใต้จำนวน 8 พันธุ์ และรายงานปริมาณฟีนอลิกในรูปของกรดแกลลิก เพราะพบกรดแกลลิกปริมาณสูงในข้าวและร่างกายสามารถดูดซึมไปใช้งานได้สูง จากการทดลองในการสกัดสารโพลิฟีนอลใช้ตัวทำละลายคือเมทานอล น้ำและกรดฟอร์มิก (50:48.5:1.5 v/v) ผลการทดลองพบว่าปริมาณสารสกัดที่ได้จากตัวอย่างข้าวอยู่ในช่วง 3.88-2.56 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก (ตารางที่ 29) ข้าว RWR-96060 มีปริมาณสารสกัดหยาบสูงสุด ข้าว HK มีปริมาณสารสกัดหยาบต่ำที่สุด ข้าวกล้องมีปริมาณโพลิฟีนอลอยู่ในช่วง 58.89-329.24 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ข้าวกล้อง BWR-96044 มีปริมาณโพลิฟีนอลสูงสุด และข้าวกล้อง KN มีปริมาณโพลิฟีนอลต่ำสุด โพลิฟีนอลที่พบในข้าวกล้อง HK ไม่แตกต่างกับข้าว SY, RWR-96060 และ KR

จากการศึกษาของ Shen *et al.* (2009) พบว่าปริมาณโพลิฟีนอลที่สกัดได้จากข้าวมีความสัมพันธ์กับขนาดและรูปร่างของเมล็ดข้าว จากการทดลองนี้พบว่าข้าวกล้อง BWR-96025, BWR-96044 และ CMP มีความยาวเมล็ดมากกว่าพันธุ์อื่นๆ ทำให้มีพื้นที่ผิวของเมล็ดมากส่งผลให้มีปริมาณสารโพลิฟีนอลสูงไปด้วย ข้าวกล้อง KR ถึงแม้ว่าจะมีความยาวของเมล็ดสูงที่สุด แต่กลับพบว่าปริมาณโพลิฟีนอลต่ำ อาจเป็นผลมาจากรงควัตถุของเมล็ดข้าวพันธุ์นี้สีอ่อนกว่าข้าวอีกสามพันธุ์ที่กล่าวมาแล้ว

ตารางที่ 29 ปริมาณสาร โพลีฟีนอลในตัวอย่างข้าวมีสี

พันธุ์ข้าว		เชื้อใย (%)	โพลีฟีนอล (mg GAE/100g ตัวอย่าง)
ข้าวเจ้า	HK	2.56	80.44±6.61 ^b
	KN	3.20	58.89±6.89 ^a
	SY	3.06	82.01±7.90 ^b
ข้าวเหนียว	RWR-96060	3.88	84.43±3.61 ^b
	BWR-96025	3.36	280.15±9.83 ^d
	CMP	3.17	208.42±0.00 ^c
	KR	3.54	80.17±4.49 ^b
	BWR-96044	3.46	329.24±6.72 ^c

ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ($p < 0.05$)

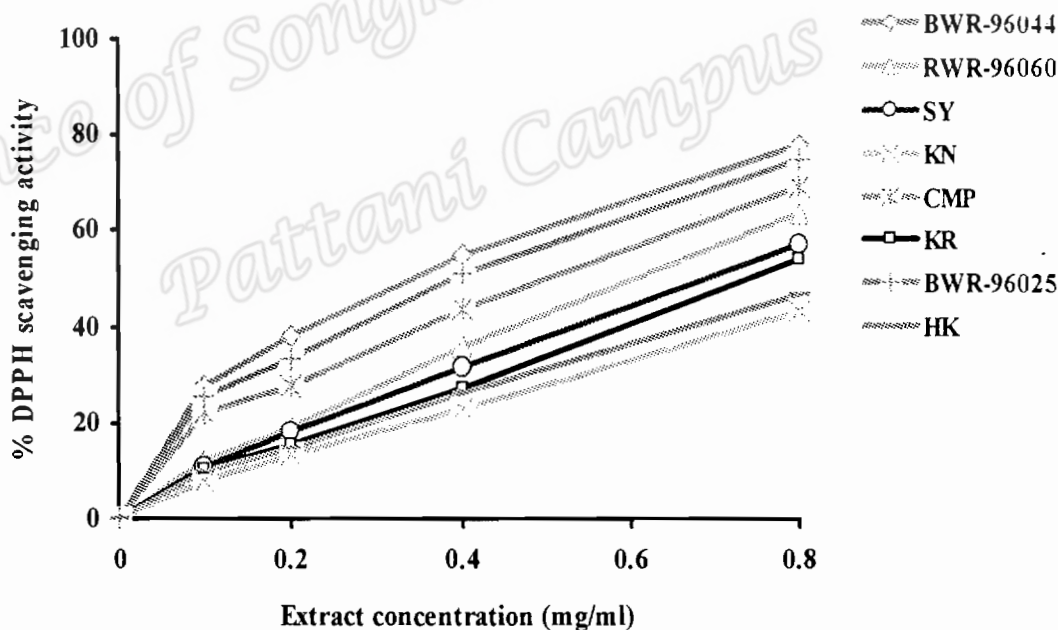
เปรียบเทียบผลการศึกษานี้กับการศึกษาของ Chotimarkom *et al.* (2008) สุพิศา (2547) และ Choi *et al.* (2007) ดังตารางที่ 29 พบว่าข้าวมีสีที่พบในภาคใต้ทั้ง 8 พันธุ์ มีปริมาณโพลีฟีนอลโดยรวมต่ำกว่าอ้างอิงดังกล่าว ทั้งนี้เพราะมีความแตกต่างในเรื่องพันธุ์และเทคนิคในการสกัด จากการศึกษาพบว่า การใช้เมทานอลและกรดเป็นตัวทำละลายจะให้ผลในการสกัดที่ดีกว่าการใช้เอทานอลเพียงอย่างเดียว จากการศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณโพลีฟีนอลกับค่า L^* a^* และ b^* พบว่าค่า L^* a^* และ b^* มีความสัมพันธ์กับปริมาณโพลีฟีนอลดังตารางภาคผนวกที่ 5 ($r = -0.893, -0.851$ และ -0.928 ตามลำดับ) จากการศึกษาของ Goffman and Bergman (2004) พบว่าสีของเชื้อหุ้มเมล็ดมีความสัมพันธ์กับปริมาณของโพลีฟีนอลอย่างมีนัยสำคัญ ที่ส่งผลให้ปริมาณสารโพลีฟีนอลที่สกัดได้แตกต่างกัน โพลีฟีนอลมักพบอยู่ในชั้นของเชื้อหุ้มเมล็ด โดยมีการทำพันธะโควาเลนต์กับสารโพลีเมอร์ที่ไม่ละลายน้ำ เมล็ดพืชที่มีสีของเชื้อหุ้มเมล็ดเข้ม มักพบว่ามีปริมาณของโพลีฟีนอลสูงด้วย (Choi *et al.*, 2007) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการทดลองในครั้งนี้

ตารางที่ 30 เปรียบเทียบปริมาณสารโพลีฟีนอลจากตัวอย่างข้าวขาวและข้าวมีสี

ตัวอย่างข้าว	โพลีฟีนอล (mg/g ตัวอย่าง)	อ้างอิง	
ข้าวขาว	Khao Dawk Mali 105	2.9	Chotimarkorn <i>et al.</i> (2008)
	Pathum Thani 60	3.2	
	Suphan Buri 90	2.8	
	Chainat 1	2.2	
	RD 13	2.7	
ข้าวมีสี	Phrae 3437	0.00-3.10	Supisa (2005)
	Phrae 0023		
	Kam-Suphan		
	San-Pha-Tawng 1		Choi <i>et al.</i> (2007)
	Sorghum	7.33	
Black rice	3.13	Nadia <i>et al.</i> (2008)	
Rice from Brazil	3.42-5.15		

4.2.5 ความสามารถในการกำจัดอนุมูล DPPH ของสารโพลีฟีนอลจากข้าวกล้อง

DPPH เป็นอนุมูลอิสระที่เกิดจากอนุมูลของไนโตรเจน มีสีม่วงเข้ม ไม่ต้องการ generate radical ซึ่ง DPPH ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ไม่ละลายน้ำ มีความเสถียรสูง ฉะนั้นวิธีการนี้จึงมีข้อจำกัดในการวิเคราะห์ เพราะใช้ได้เฉพาะตัวอย่างสารต้านอนุมูลอิสระที่ไม่ละลายน้ำเท่านั้น ดังนั้นความสามารถของสารต้านอนุมูลอิสระที่ศึกษานี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของสารต้านอนุมูลอิสระในการรวมตัวกับ DPPH ที่อยู่ในรูปอนุมูลอิสระที่เสถียรที่อยู่ในสารละลาย โดยในการทดสอบนี้จะให้ DPPH (มีสีม่วงเข้ม) ทำปฏิกิริยากับสารต้านอนุมูลอิสระในระยะเวลาที่กำหนด วัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร ดังนั้นการลดลงของความเข้มข้นของ DPPH (สีอ่อนลง) บ่งบอกถึงความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระของสารต้านอนุมูลอิสระ จากการศึกษาความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากข้าวมีสีทั้ง 8 ชนิดได้ผลดังแสดงในรูปที่ 7



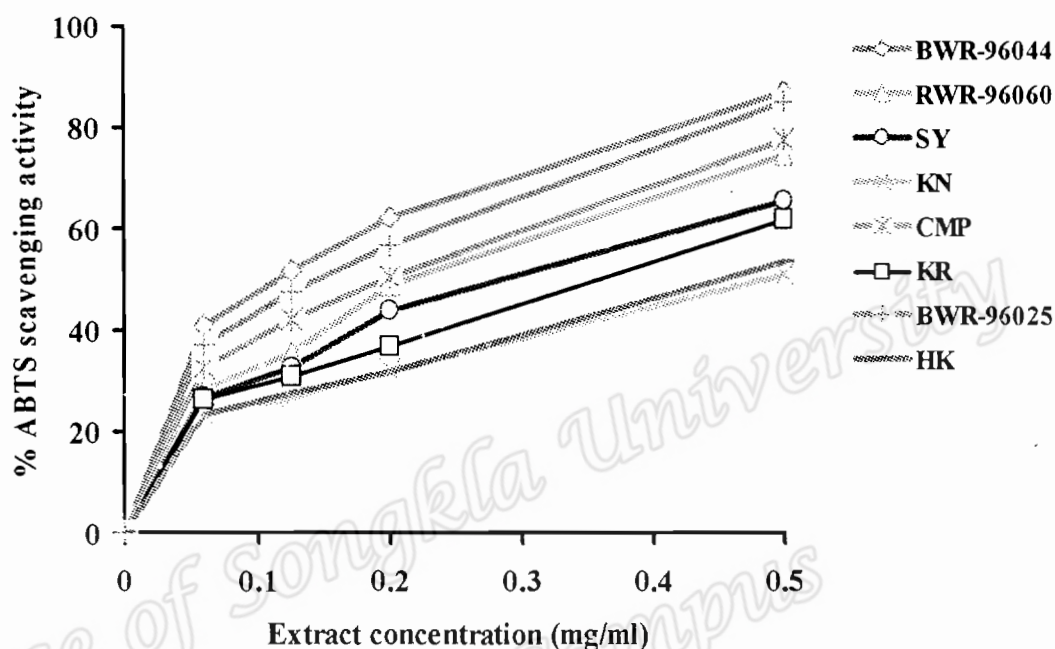
รูปที่ 7 ความสามารถในการกำจัดอนุมูล DPPH ของสารสกัดจากข้าวมีสี

ผลการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดจากข้าวกล้องมีสูงขึ้นไปความสามารถในการขจัดอนุมูล DPPH สูงขึ้น สารสกัดจากข้าวกล้องพันธุ์ BWR-96044 มีความสามารถในการขจัดอนุมูล DPPH มากที่สุด รองลงมาคือ ข้าวกล้องพันธุ์ BWR-96025, CMP, RWR-96060, SY, KR, HK และ KN ความสามารถในการขจัดอนุมูล DPPH มีความสัมพันธ์กับปริมาณสารโพลีฟีนอลในสารสกัด กล่าวคือข้าวกล้อง BWR-96044 มีปริมาณสารโพลีฟีนอลสูง ทำให้มีความสามารถในการขจัดอนุมูล DPPH สูงด้วย แต่ข้าวกล้อง KN มีปริมาณสารโพลีฟีนอลต่ำความสามารถในการขจัดอนุมูล DPPH จึงต่ำด้วย ผลการทดลองที่ได้มีความคล้ายคลึงกับการศึกษาของ Iqbal *et al.* (2005) ที่ได้ศึกษาปริมาณและความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากข้าว 5 พันธุ์ คือ RB-kr, RB-s2, RB-bm, RB-86 และ RB-sf ผลการทดลองพบว่าความสามารถในการขจัดอนุมูลอิสระ DPPH แปรผันตรงกับปริมาณของสารโพลีฟีนอลที่สกัดได้ และจากการการศึกษาของ Chotimarkorn *et al.* (2008) ได้ศึกษาปริมาณสารโพลีฟีนอลและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากข้าวในประเทศไทยจำนวน 5 พันธุ์ ซึ่งเป็นข้าวที่ไม่มีรวงวัดได้แก่ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ข้าวปทุมธานี 60 ข้าวสุพรรณบุรี 90 ข้าวชัยนาท 1 และข้าว กข 13 พบว่าความสามารถในการขจัดอนุมูล DPPH แปรผันตรงกับปริมาณของสารโพลีฟีนอลเช่นเดียวกัน

4.2.6 ความสามารถในการขจัดอนุมูล ABTS ของสารโพลีฟีนอลจากข้าวกล้อง

ABTS เป็นอนุมูลอิสระประเภทไอออนบวก ก่อนนำมาใช้ต้อง generate radical โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ซึ่งปฏิกิริยาระหว่างสารต้านอนุมูลอิสระกับ ABTS เกิดได้รวดเร็วในสภาวะที่เป็นกรดจนถึงกลาง อนุมูลอิสระของ ABTS ละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำ จึงใช้วิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้กว้างกว่าวิธีการใช้ DPPH จากรูปที่ 8 พบว่าความสามารถในการขจัดอนุมูล ABTS ของสารสกัดที่ได้จากข้าวกล้องจะมีค่าสูงกว่าการใช้อนุมูล DPPH เนื่องจากวิธี ABTS เป็นการหาความสามารถของสารต้านอนุมูลอิสระที่ละลายได้ในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ ซึ่งผลการทดลองนี้มีความคล้ายคลึงกับการศึกษาของ Iqbal (2005) ที่พบว่าความสามารถในการขจัดอนุมูล ABTS ของสารที่สกัดได้จากข้าวในป่ากีสถานมีค่าสูงกว่าการใช้อนุมูล DPPH จากการทดลองพบว่าข้าวกล้อง BWR-96044 มีความสามารถในการขจัดอนุมูล ABTS มากที่สุด และรองลงมาคือ ข้าวกล้องพันธุ์ BWR-96025, CMP, RWR-96060, SY, KR, HK และ KN ความสามารถในการขจัดอนุมูล ABTS มีความสัมพันธ์กับปริมาณสารโพลีฟีนอล คือข้าวกล้อง BWR-96044 มีปริมาณสารโพลีฟีนอลสูง ทำให้ความสามารถในการขจัดอนุมูล ABTS สูงตามไปด้วย แต่ข้าวกล้อง KN มีปริมาณสารโพลีฟีนอลต่ำ ความสามารถในการขจัดอนุมูล ABTS

จึงต่ำ แนวโน้มในการต้านอนุมูลอิสระเพิ่มเมื่อความเข้มข้นของสารโพลีฟีนอลเพิ่มขึ้น (Iqbal *et al.*, 2005; Choi *et al.*, 2007; Shen *et al.*, 2009)



รูปที่ 8 ความสามารถในการกำจัดอนุมูล ABTS^{•+} ของสารสกัดจากข้าวมีสี

เมื่อเทียบประสิทธิภาพในการขจัดอนุมูล DPPH และ ABTS ของสารสกัดที่ได้จากข้าวกล้องกับสารมาตรฐาน Trolox พบว่าสารมาตรฐาน Trolox มีความสามารถขจัดอนุมูลทั้งสองได้ดีกว่าแม้ใช้เพียงแค่ความเข้มข้นต่ำๆ (0-20 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร) เนื่องจากสารมาตรฐานมีความบริสุทธิ์สูงและสามารถรีดิวซ์ได้ดีกว่าสารสกัดจากข้าวมีสี ค่าความสามารถในการขจัดอนุมูล ABTS ที่คำนวณหาความเข้มข้นที่เทียบเท่ากับสารมาตรฐาน พบว่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่ได้จากข้าวกล้องมีสีทั้ง 8 ชนิดอยู่ในช่วง 0.22-0.10 มิลลิโมลาร์ต่อกรัมตัวอย่าง ผลการทดลองที่ได้คล้ายคลึงกับการศึกษาของ Shen *et al.* (2009) กล่าวคือความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS จากสารสกัดที่ได้จากข้าวมีสีอยู่ในช่วง 0.44-0.17 มิลลิโมลาร์ต่อกรัมตัวอย่าง

จะเห็นได้ว่าสารสกัดจากข้าวมีสีมีความสามารถขจัดอนุมูลอิสระ และเมื่อศึกษาความสัมพันธ์พบว่า ปริมาณของสารโพลีฟีนอลและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมีความสัมพันธ์กับสีของเมล็ด (L^* , a^* และ b^*) ดังตารางภาคผนวกที่ 6 ($r = -0.794$, -0.629 และ -0.770) กล่าวคือเมื่อค่า L^* , a^* และ b^* ลดลงส่งผลให้ความสามารถในการขจัดอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น

ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับ Shen *et al.* (2009) ที่พบว่าความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระมีความสัมพันธ์เชิงลบกับค่า L^* a^* และ b^* นอกจากนี้มีงานวิจัยจำนวนหนึ่งได้กล่าวว่าการต้านอนุมูลอิสระที่ได้จากธรรมชาติมีผลต่อการต้านเซลล์มะเร็ง ด้านการอักเสบของเนื้อเยื่อ ลดความเปราะบางของหลอดเลือด และลดการเกิดโรคหัวใจ (Bridle and Timberlake, 1996; Harbone and Grayer, 1998;) ดังนั้นข้าวที่มีรงควัตถุจึงมีศักยภาพสูงในการพัฒนาเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อสุขภาพ

Prince of Songkla University
Pattani Campus

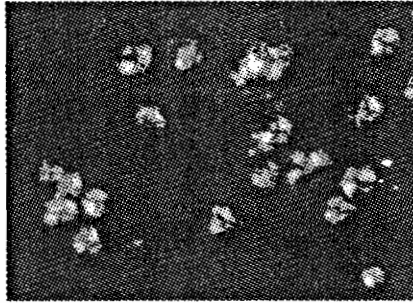
4.3 สมบัติของสตาร์ชข้าว

เตรียมตัวอย่างสตาร์ชข้าวตามวิธีการในข้อ 3.3.1.4 สตาร์ชที่ได้นำไปศึกษาสมบัติ ดังนี้ สมบัติด้านโครงสร้าง (ลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ช ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ช รูปแบบโครงสร้างผลึก และความหนืดคือนทรินลิก) สมบัติทางเคมี (ความชื้น โปรตีน ไขมัน เยื่อใย และเถ้า) และสมบัติเชิงหน้าที่ (กำลังการพองตัว ความสามารถในการละลาย ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ช การเกิดเจลทาทีในเซชัน การเกิดรีโทรกราเดชัน ความคงทนต่อการแช่เยือกแข็งและการทำละลาย ความแข็งแรงและความคงตัวของเจล)

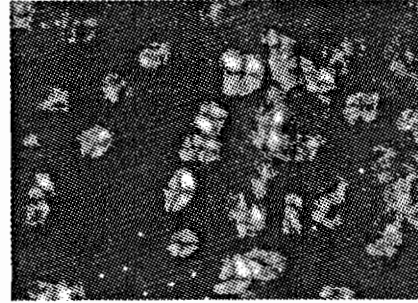
4.3.1 สมบัติด้านโครงสร้างของสตาร์ชข้าว

4.3.1.1 ลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ช

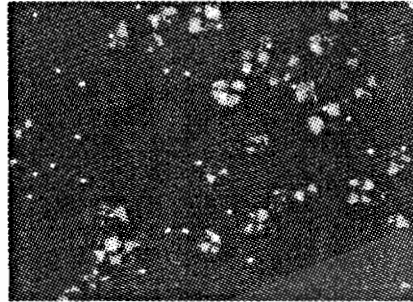
จากการศึกษารูปร่างของเม็ดสตาร์ชดิบด้วยกล้องจุลทรรศน์ระบบแสงโพลาไรซ์ พบว่าสตาร์ชมีคุณสมบัติในการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ เกิดลักษณะของมอลตีสครอล (Maltese cross) ดังรูปที่ 9 แสดงถึงโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Semi crystalline) ของแป้งดิบ และไม่มี ความแตกต่างกันในพันธุ์ข้าวทั้ง 8 พันธุ์ ขณะที่การส่องดูเม็ดสตาร์ชภายใต้แสงปกติ (รูปที่ 10) จะไม่พบ มอลตีสครอล แต่มองเห็นรูปร่างเม็ดสตาร์ชมีลักษณะหลายเหลี่ยม สตาร์ชข้าวบางพันธุ์จะพบจุด เล็กๆ บนเม็ดสตาร์ชเรียกว่าไฮลัม ซึ่งเป็นจุดกำเนิดของโครงสร้างของเม็ดสตาร์ช ซึ่งผลการทดลอง ก็มีความคล้ายคลึงกับการศึกษาของ รุ่งนภา และคณะ (2546) ซึ่งพบว่าเม็ดสตาร์ชข้าวดิบที่พบใน ประเทศไทย เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จะพบลักษณะมอลตีสครอลเช่นกัน



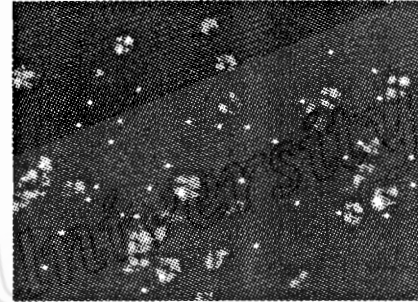
HK



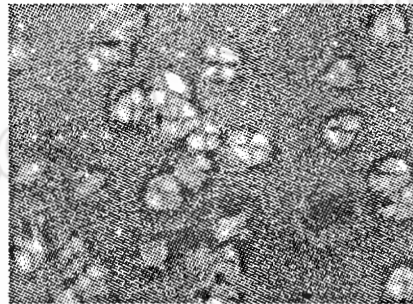
KN



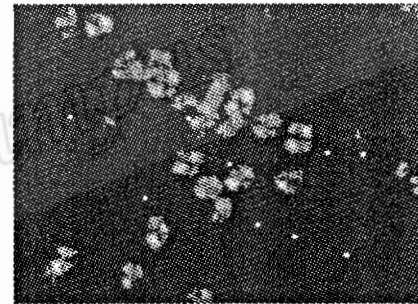
SY



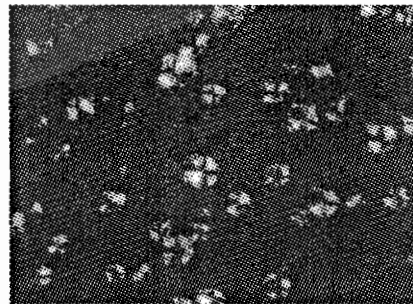
CMP



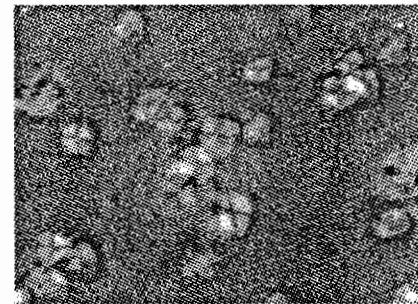
RWR-96060



BWR-96044

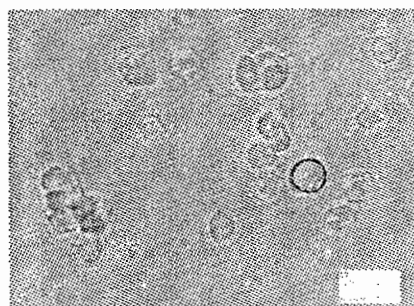


BWR-96025

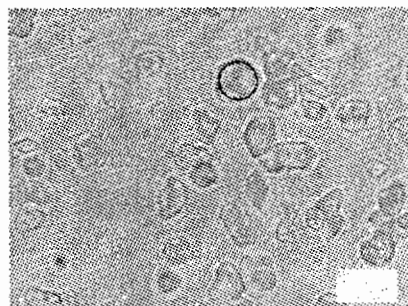


KR

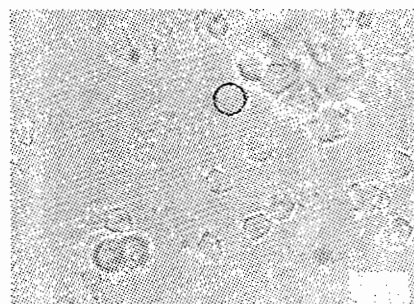
รูปที่ 9 ลักษณะของเมื่อดสตาร์ชเมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์โพลาไรซ์ที่กำลังขยาย 100 เท่า



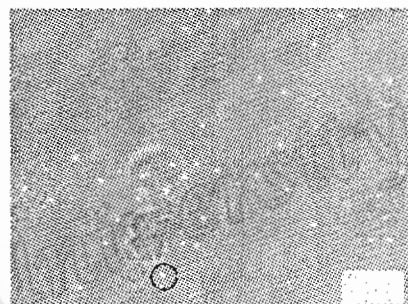
HK



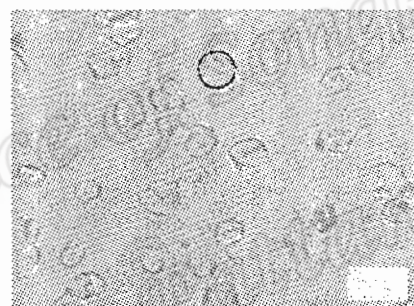
KN



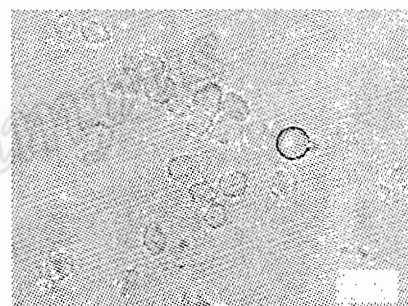
SY



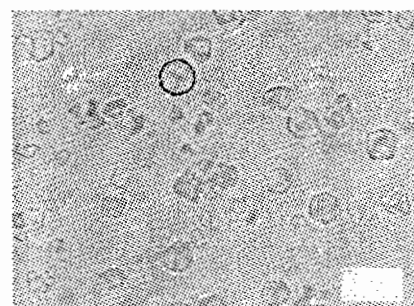
CMP



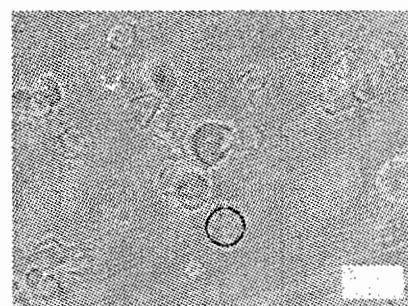
RWR-96060



BWR-96044



BWR-96025

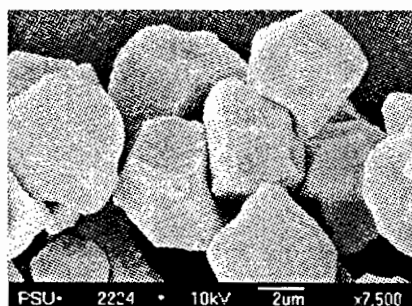


KR

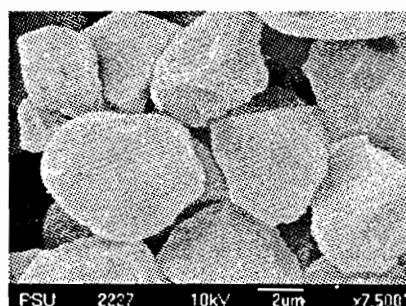
รูปที่ 10 ลักษณะของเม็ดสตาเร่เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงปกติที่กำลังขยาย 100 เท่า

ผลการศึกษารูปร่างเม็ดสตาร์ชด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่ามีรูปร่างหลายเหลี่ยม (Polyhedral morphology) และคล้ายกันทั้ง 8 ชนิด (รูปที่ 11) เม็ดสตาร์ชที่ได้จากรั้วพืชส่วนมากจะมีลักษณะรูปร่างเช่นเดียวกัน เม็ดสตาร์ชมีการกระจายตัวที่ดีและไม่มีการเกาะกลุ่ม ผลการทดลองคล้ายคลึงกับการศึกษาของ Sodhi and Singh (2003) ที่ได้ศึกษารูปร่างและขนาดของสตาร์ชข้าวจากอินเดียจำนวน 5 พันธุ์คือ PR-106, PR-114, PR-103, IR-8 และ PR-113 ด้วยเครื่อง SEM ผลการทดลองพบว่าเม็ดสตาร์ชส่วนมากมีรูปร่างแบบหลายเหลี่ยม นอกจากนี้รูปร่างเม็ดสตาร์ชข้าวในประเทศไทยก็มีรายงานว่ามีความรูปร่างหลายเหลี่ยมเช่นเดียวกัน (รุ่งนภา และคณะ, 2546; สุพิศา, 2547)

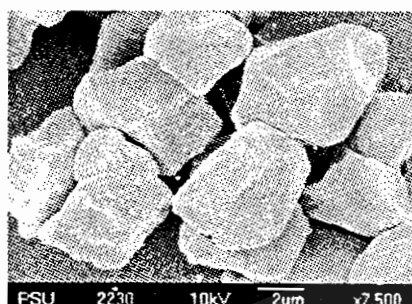
Prince of Songkla University
Pattani Campus



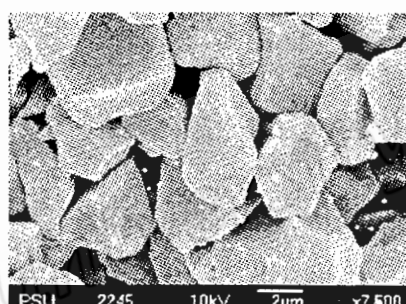
HK



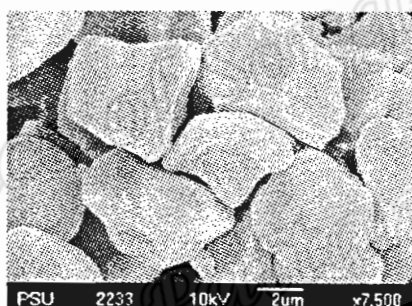
KN



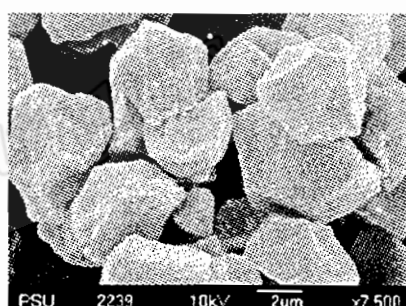
SY



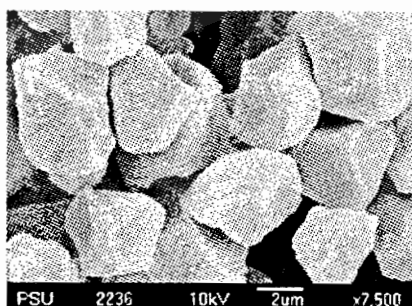
CMP



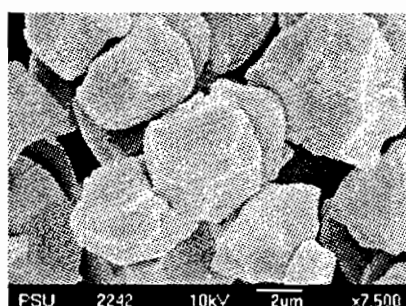
RWR-96060



BWR-96044



BWR-96025



KR

รูปที่ 11 ลักษณะเม็ดสตาร์ชเมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ก้ำกั๊งขยาย 7500 เท่า

4.3.1.2 การกระจายตัวและขนาดของเม็ดสตาร์ช

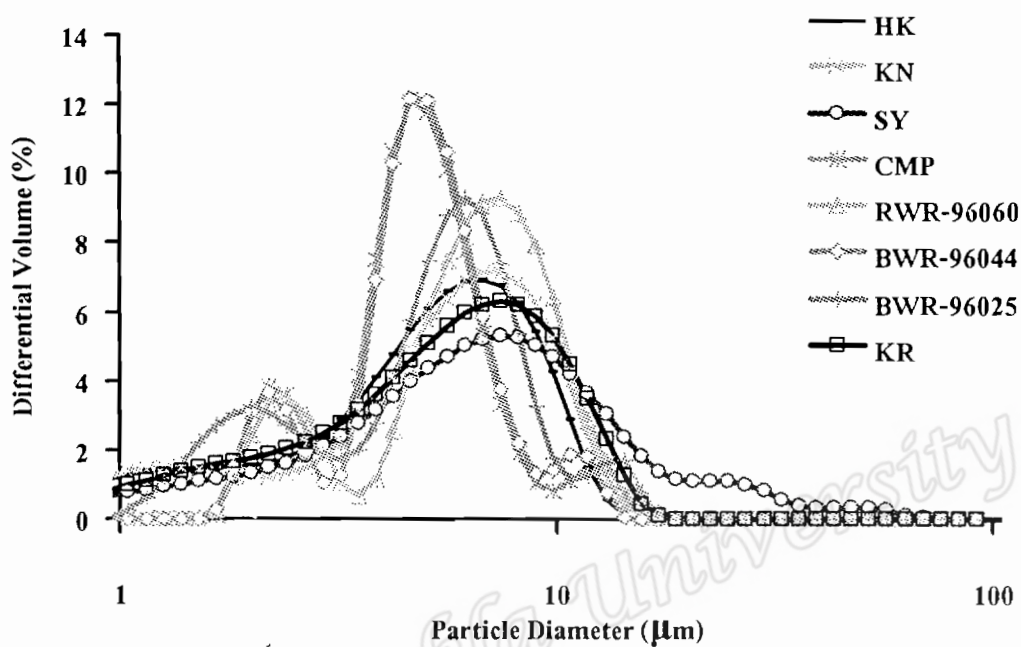
การศึกษาการกระจายตัวและขนาดของเม็ดสตาร์ชข้าวมีสีพันธุ์ต่างๆ พบว่าส่วนมากมีการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ชอยู่ในช่วงแคบคือ 0-10 ไมโครเมตร จัดเป็นสตาร์ชที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ยกเว้นสตาร์ช SY ที่มีการกระจายตัวค่อนข้างกว้าง พบว่ามีการกระจายตัวที่ขนาด 10-100 ไมโครเมตรประมาณ 21.34 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 11) ซึ่งส่งผลต่อกำล้างการพองตัวที่สูงด้วยขนาดเฉลี่ยของเม็ดสตาร์ช HK, KN, SY, CMP, RWR-96060, BWR-96044, BWR-96025 และ KR คือ 5.56, 5.98, 9.11, 5.35, 6.38, 5.56, 5.81 และ 6.27 ไมโครเมตรตามลำดับ (ตารางที่ 31)

ตารางที่ 31 การกระจายตัวและขนาดเฉลี่ยของเม็ดสตาร์ช

พันธุ์ข้าว	การกระจายตัวของเม็ดสตาร์ช			
	0-10 μm (%)	10-100 μm (%)	ขนาดเฉลี่ย (μm)	
ข้าวเจ้า	HK	97.87	2.11	5.56 \pm 3.03
	KN	95.91	4.08	5.98 \pm 3.27
	SY	78.66	21.34	9.11 \pm 8.75
ข้าวเหนียว	CMP	96.14	3.97	5.35 \pm 2.43
	RWR-96060	96.92	3.05	6.38 \pm 2.77
	BWR-96044	96.18	2.64	5.56 \pm 2.51
	BWR-96025	94.51	5.49	5.81 \pm 3.14
	KR	92.37	7.60	6.27 \pm 3.54

ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

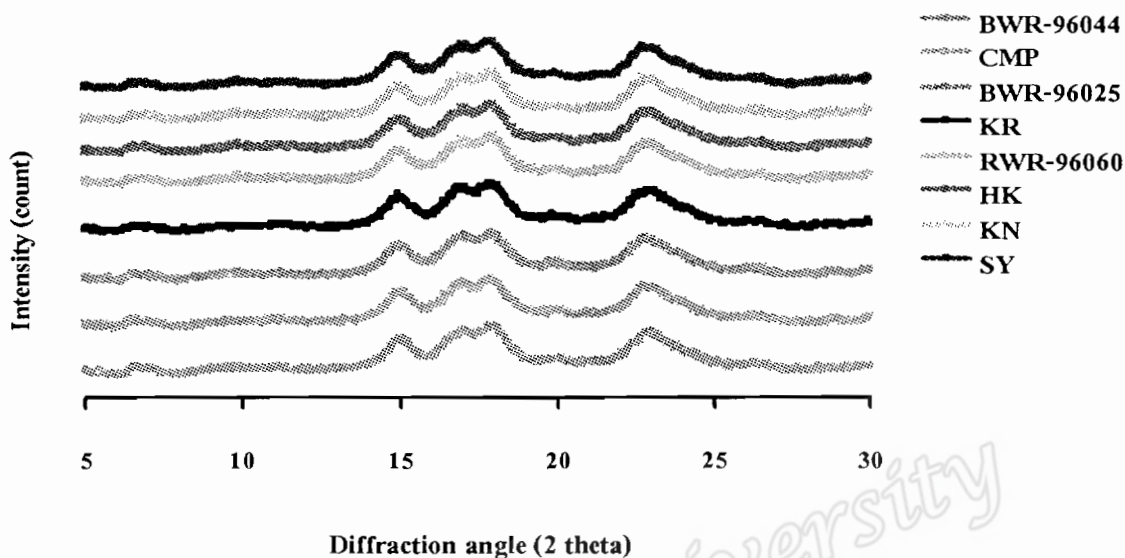
ผลการทดลองมีความคล้ายคลึงกับการศึกษาของ รุ่งนภา และคณะ (2546) ที่ศึกษาขนาดของเม็ดสตาร์ชข้าวในประเทศไทย พบว่ามีขนาดเฉลี่ยในช่วง 6-9 ไมโครเมตร แต่จากการศึกษาของสุพิศา (2546) รายงานว่าขนาดของเม็ดสตาร์ชที่เตรียมจากข้าวพื้นเมืองที่มีรังควัตถุในประเทศไทยมีขนาดอนุภาคในช่วง 20-40 ไมโครเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยครั้งนี้ พบว่าขนาดของเม็ดสตาร์ชที่ได้จากการศึกษาของ สุพิศา (2546) มีขนาดใหญ่กว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเม็ดแป้งมีองค์ประกอบของเยื่อใยที่มาจากเยื่อหุ้มเมล็ด และโปรตีนสะสมที่ไม่ได้ทำการสกัดออกไป จึงส่งผลให้มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า ปัจจัยที่ทำให้เม็ดสตาร์ชข้าวมีขนาดแตกต่างกันคือลักษณะทางพันธุกรรม และสภาวะสิ่งแวดล้อมขณะที่มีการพัฒนาเป็นเมล็ดข้าว (Sodhi and Singh, 2003)



รูปที่ 12 แสดงการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ช

4.3.1.3 รูปแบบโครงสร้างผลึก

ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวที่ใช้ในการทดลองด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer) พบว่าสตาร์ชข้าวมีลักษณะที่ใช้ในการทดลองมีโครงสร้างผลึกแบบ A โดยจะปรากฏพีคหลักที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 15 องศา จำนวน 1 พีค ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 17-18 องศา จำนวน 2 พีคที่เชื่อมต่อกัน และตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 23 องศา จำนวน 1 พีค ซึ่งลักษณะรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ A จะพบมากในสตาร์ชข้าว (Bluleon *et al.*, 1998; Jaroen *et al.*, 1995; Ratnayake and Jackson, 2007) ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 รูปแบบโครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวมีสีทั้ง 8 ชนิด

4.3.1.4 ความหนืดอินทรีนลิก

ความหนืดอินทรีนลิกเป็นสมบัติทางโมเลกุลอย่างหนึ่ง ได้จากการวัดความหนืดของสตาร์ชผ่านหลอดคอปิลลารีในสถานะที่เจือจาง เป็นสมบัติที่บ่งบอกถึง Hydrodynamic volume ผลการทดลองพบว่า สตาร์ชข้าวเจ้ามีความหนืดอินทรีนลิกในช่วง 63.53-75.13 มิลลิลิตรต่อกรัม ส่วนสตาร์ชข้าวเหนียวมีค่าความหนืดอินทรีนลิกในช่วง 83.86-101.83 มิลลิลิตรต่อกรัม จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าสตาร์ชข้าวทั้ง 8 ชนิดมีความหนืดอินทรีนลิกที่แตกต่างกัน สตาร์ชข้าวเจ้ามีค่าความหนืดอินทรีนลิกต่ำกว่าสตาร์ชข้าวเหนียวโดยมีผลสอดคล้องกับกำลังการพองตัว พบว่า ปริมาณอะไมโลสมีความสัมพันธ์เชิงลบกับความหนืดอินทรีนลิก ($r = -0.877$) ดังตารางภาคผนวกที่ 7

ปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนืดอินทรีนลิก คือ ขนาดและรูปร่างโมเลกุล ความยาวของสายโมเลกุล และความเป็นไอออนของสารละลาย (Noosuk, 2003) ซึ่งรูปร่างของอะไมโลสจะมีรูปร่างเป็นแบบแท่ง อะไมโลเพคตินจะมีรูปร่างแบบทรงกลม แต่ขนาดของอะไมโลเพคตินจะใหญ่กว่าอะไมโลส เนื่องจากอะไมโลเพคตินมีกิ่งก้านสาขามาก ทำให้เคลื่อนที่ในหลอดคอปิลลารีช้ากว่าอะไมโลส ดังนั้นสตาร์ชที่มีสัดส่วนของอะไมโลสสูงอย่างเช่นสตาร์ชข้าวเจ้าจะมีค่าความหนืดอินทรีนลิกต่ำกว่าสตาร์ชข้าวเหนียว ซึ่งแนวโน้มนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Noosuk *et al.* (2003) แต่ค่าความหนืดอินทรีนลิกที่ได้มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการอ้างอิงข้างต้น

ตารางที่ 32 ค่าความหนืดอินทรีนติกของสตาร์ชข้าวมีสี

	พันธุ์ข้าว	ความหนืดอินทรีนติก (ml/g)
ข้าวเจ้า	HK	63.53±0.61 ^a
	KN	69.86±0.23 ^b
	SY	75.13±0.92 ^c
ข้าวเหนียว	RWR 96060	89.60±0.43 ^e
	BWR 96025	96.76±0.28 ^g
	CMP	83.86±0.41 ^d
	KR	101.83±0.40 ^h
	BWR 96044	94.16±0.57 ^f

ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ
ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ($p < 0.05$)

4.3.2 สมบัติทางเคมี

ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชข้าว แสดงดังตารางที่ 33 ปริมาณความชื้นของสตาร์ชข้าวทุกพันธุ์อยู่ในช่วง 6.70-8.89 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าความชื้นของสตาร์ชข้าว KN CMP และ KR มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับปริมาณ โปรตีนพบว่าสตาร์ชข้าวทุกพันธุ์มีโปรตีนไม่แตกต่างกันโดยอยู่ในช่วง 0.67-0.69 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ปริมาณไขมันอยู่ในช่วง 0.02-0.19 เปอร์เซ็นต์ และไม่แตกต่างกันทางสถิติ เนื้อใยของสตาร์ชข้าวทั้ง 8 พันธุ์มีน้อยมากไม่สามารถตรวจวัดได้ด้วยวิธีการของ AOAC สำหรับปริมาณเถ้าของสตาร์ชข้าวทุกชนิด (ยกเว้นพันธุ์ BWR-96044) ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยอยู่ในช่วง 0.26-0.49 เปอร์เซ็นต์ องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชข้าวทุกพันธุ์ มีค่าต่ำกว่าข้าวกล้องและข้าวขัดขาว เนื่องจากสตาร์ชข้าวได้กำจัดเอาเยื่อหุ้มเมล็ดที่อุดมไปด้วยโปรตีน ไขมัน เยื่อใยและเถ้า (Mohapatra and Bal, 2007; Roy *et al.*, 2008)

สำหรับปริมาณอะไมโลสในสตาร์ชพบว่า สตาร์ชข้าวเจ้าทั้ง 3 ชนิด คือ HK KN และ SY มีปริมาณอะไมโลส 28.19 25.30 และ 18.30 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาการจำแนกกลุ่มข้าวตามปริมาณอะไมโลสพบว่าข้าวพันธุ์ SY เป็นข้าวในกลุ่มอะไมโลสต่ำ ส่วนข้าวพันธุ์ HK และ KN เป็นข้าวในกลุ่มอะไมโลสสูง ส่วนสตาร์ชข้าวเหนียว 5 ชนิด คือ RWR-96060 BWR-96025 CMP KR และ BWR-96044 มีปริมาณอะไมโลสในช่วง 7.25-8.57 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ปริมาณอะไมโลสที่ศึกษาครั้งนี้มีค่าสูงกว่าปริมาณอะไมโลสที่พบในข้าวเหนียว แต่มีความคล้ายคลึงกับการศึกษาของ สุพิศา (2547) ที่พบว่าข้าวเหนียวในกลุ่มของข้าวมีสีในประเทศไทยมีปริมาณอะ

ไมโทสค่อนข้างสูงโดยอยู่ในช่วง 3-7 เปอร์เซ็นต์ (จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการทำปฏิกิริยากับ ไอโอดีน) สาเหตุที่ปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชข้าวเหนียวที่วิเคราะห์ได้จากการศึกษาครั้งนี้มีค่าสูงกว่าปริมาณอะไมโลสที่พบในสตาร์ชข้าวเหนียวทั่วไปที่พบในประเทศไทย (ซึ่งมีปริมาณอะไมโลสอยู่ในช่วง 0-3 เปอร์เซ็นต์) ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากวิธีการวิเคราะห์ การศึกษานี้ใช้วิธีการทำปฏิกิริยากับไอโอดีน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วทั้งอะไมโลสและอะไมโลเพคตินสามารถพัฒนาสีได้กับ ไอโอดีน โดยอะไมโลเพคตินจะให้สีแดง (อรอนงค์, 2545) จึงอาจมีผลให้ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสตาร์ชมีค่าสูงเกินความจริงและส่งผลกระทบต่อค่าปริมาณอะไมโลสสูงกว่าปกติด้วยการวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสอาจใช้วิธีการอื่นเช่น วิธีการตกตะกอนอะไมโลเพคตินด้วย Concanavalin A ก่อนการวิเคราะห์หรืออาจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโครมาโตกราฟีที่ช่วยลดการแปรปรวนในการทดลองได้ อะไมโลสเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของสตาร์ชและคุณภาพการหุงต้มและการรับประทานของข้าวซึ่งจะอภิปรายต่อไป

Prince of Songkhla University
Pattani Campus

ตารางที่ 33 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชข้าวมีสี

Rice varieties	อะไมโลส (% db.)	ความชื้น (% wb.)	ไขมัน (% db.)	โปรตีน (% db.)	คาร์โบไฮเดรต* (% db.)	เยื่อใย (% db.)	เถ้า (% db.)
HK	28.19±0.27 ^e	8.17±0.12 ^{cd}	0.02±0.05 ^a	0.68±0.00 ^a	90.84±0.13 ^b	Tr	0.26±0.05 ^a
ข้าวเจ้า KN	25.30±1.27 ^f	6.70±0.17 ^a	0.13±0.04 ^{ab}	0.69±0.00 ^a	92.16±0.10 ^d	Tr	0.30±0.17 ^a
SY	18.30±0.12 ^e	8.89±0.72 ^d	0.15±0.05 ^{ab}	0.67±0.00 ^a	90.00±0.68 ^a	Tr	0.26±0.05 ^a
RWR-96060	8.57±0.26 ^{cd}	7.84±0.20 ^{bc}	0.18±0.08 ^b	0.68±0.00 ^a	90.85±0.29 ^b	Tr	0.43±0.06 ^a
BWR-96025	7.31±0.26 ^b	7.17±0.36 ^{ab}	0.12±0.05 ^{ab}	0.69±0.03 ^a	91.71±0.44 ^{cd}	Tr	0.28±0.09 ^a
ข้าวเหนียว CMP	8.74±0.47 ^d	6.73±0.23 ^a	0.03±0.05 ^a	0.69±0.00 ^a	92.17±0.24 ^d	Tr	0.36±0.05 ^a
KR	7.25±0.27 ^a	6.82±0.65 ^a	0.19±0.00 ^b	0.68±0.00 ^a	91.92±0.58 ^{cd}	Tr	0.36±0.05 ^a
BWR-96044	8.00±0.28 ^{bc}	7.48±0.39 ^{abc}	0.09±0.15 ^{ab}	0.68±0.00 ^a	91.24±0.25 ^{bc}	Tr	0.49±0.01 ^b

ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ($p < 0.05$)

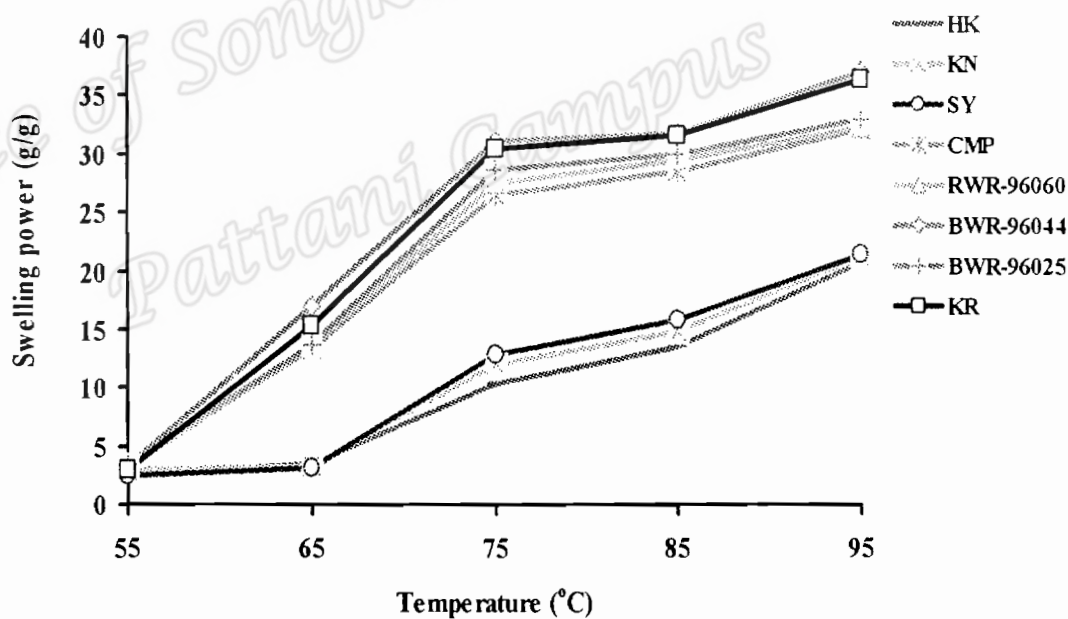
Tr หมายถึง ไม่สามารถตรวจพบ

*จากวิธีการคำนวณ

4.3.3 สมบัติเชิงหน้าที่

4.3.3.1 กำลังการพองตัว

ผลการทดลองพบว่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชข้าวพันธุ์ KR มีค่ามากที่สุด รองมาคือ BWR-96025, BWR-96044, RWR-96060, CMP, SY, KN และ HK ตามลำดับ โดยที่กำลังการพองตัวเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะไปทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในเม็ดสตาร์ช ทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถเข้าไปจับกับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระของโมเลกุลสตาร์ชได้ เม็ดสตาร์ชจึงพองตัวมากขึ้น จากการทดลองพบว่าสตาร์ชข้าวเหนียวมีกำลังการพองตัวสูงกว่าสตาร์ชข้าวเจ้า เพราะสตาร์ชข้าวเหนียวมีปริมาณอะไมโลเพคตินสูงกว่าสตาร์ชข้าวเจ้า ซึ่งโครงสร้างของอะไมโลเพคตินมีกิ่งก้านสาขามาก สามารถจับกับโมเลกุลของน้ำได้ดีกว่าอะไมโลส ส่งผลให้สตาร์ชข้าวเหนียวมีการพองตัวและอุ้มน้ำได้ดีกว่า

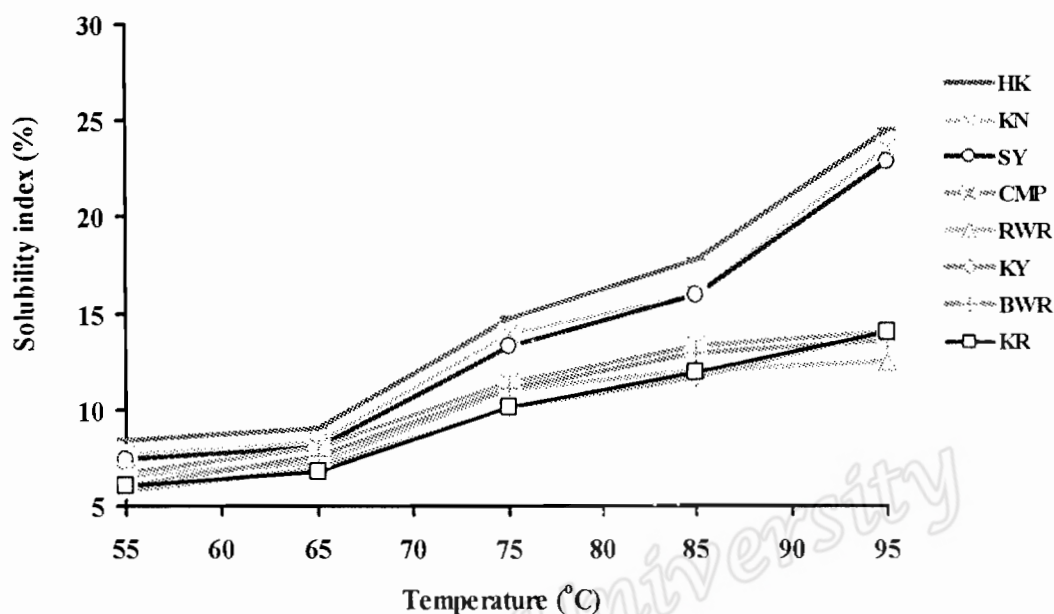


รูปที่ 14 กำลังการพองตัวของสตาร์ชข้าวมีสี

ปัจจัยที่อาจมีผลต่อกำลังการพองตัวของสตาร์ชได้แก่ ไขมัน และขนาดของเม็ดสตาร์ชซึ่งจากการทดลองนี้พบว่าสตาร์ชข้าวพันธุ์ KR และ BWR-96025 มีกำลังในการพองตัวสูงกว่าสตาร์ชข้าวพันธุ์ BWR-96044 ทั้งๆที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสตาร์ชข้าวพันธุ์ KR และ BWR-96025 มีปริมาณไขมันสูงกว่า ในระหว่างการให้ความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างไขมันและอะไมโลสกลายเป็นอะไมโลสไปปิดคอมเพล็กซ์ สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นนี้มีโครงสร้างโมเลกุลที่แข็งแรง ต้องใช้พลังงานความร้อนในการทำลายสูง ส่งผลให้มีกำลังในการพองตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าสตาร์ชที่มีปริมาณไขมันน้อย (Jacquier *et al.*, 2006) และขนาดของเม็ดสตาร์ชมีผลต่อกำลังในการพองตัว พบว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่จะมีกำลังในการพองตัวสูง (Li and Yeh, 2001) สังเกตได้อย่างชัดเจนจากกำลังในการพองตัวของสตาร์ชข้าวเจ้า คือ สตาร์ชข้าว SY มีขนาดเม็ดสตาร์ชใหญ่ที่สุดทำให้มีกำลังในการพองตัวมากที่สุด รองลงมาคือ สตาร์ชข้าวพันธุ์ KN และ HK ที่มีขนาดเม็ดสตาร์ชเล็กกว่าจึงมีกำลังในการพองตัวต่ำกว่า SY

4.3.3.2 ความสามารถในการละลาย

ผลการศึกษาพบว่าความสามารถในการละลายของสตาร์ชข้าวพันธุ์ KR มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ BWR-96025, BWR-96044, CMP, SY, KN และ HK ตามลำดับ (รูปที่ 15) โดยความสามารถในการละลายของสตาร์ชข้าวมีสีทุกพันธุ์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ การให้ความร้อนแก่สตาร์ชในสถานะที่มีน้ำเพียงพอ ความร้อนมีผลทำให้พันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย และโมเลกุลของน้ำสามารถเข้าไปจับกับหมู่ไฮดรอกซิลภายในเม็ดสตาร์ช เม็ดสตาร์ชจึงเกิดการพองตัวจนเกิดการแตกตัวของเม็ดสตาร์ช ทำให้โมเลกุลในเม็ดสตาร์ชโดยเฉพาะอะไมโลสหลุดออกจากเม็ดสตาร์ชและเกิดการละลาย ทำให้ค่าการละลายเพิ่มขึ้น (Nimsung *et al.*, 2005) จากการทดลองสังเกตพบว่าสตาร์ชข้าวเหนียวมีความสามารถในการละลายต่ำกว่าสตาร์ชข้าวเจ้า เพราะสตาร์ชข้าวเหนียวมีสัดส่วนของอะไมโอเพคตินต่ออะไมโลสสูงกว่าสตาร์ชข้าวเจ้า ซึ่งโครงสร้างของอะไมโอเพคตินเป็นโครงสร้างที่มีกิ่งก้านสาขามาก เมื่อเม็ดสตาร์ชแตกตัวทำให้โครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ถูกขังอยู่ภายในเม็ดสตาร์ช ทำให้เกิดการละลายได้น้อย



รูปที่ 15 ความสามารถในการละลายของสตาร์ชข้าวมีสี

4.3.3.3 สมบัติด้านความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าว

ความหนืดจัดเป็นสมบัติที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากที่สุดอย่างหนึ่งของสตาร์ช เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพในสภาวะที่มีน้ำและมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ คือการให้ความร้อนและการทำให้เย็น (รุ่งนภา และคณะ, 2546) การติดตามการเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการประเมินและติดตามสมบัติดังกล่าว ในขณะที่น้ำแป้งมีการเพิ่มและลดอุณหภูมิของสารแขวนลอยสตาร์ช ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชข้าวมีสีทั้ง 8 ชนิด (ตารางที่ 34) พบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดจะแตกต่างกันไปตามพันธุ์ของข้าว สตาร์ชข้าวเจ้ามีอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting temperature) สูงกว่าสตาร์ชจากข้าวเหนียว (อยู่ในช่วง 79.55-80.61 และ 70.83-72.75 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) ปัจจัยที่ส่งผลให้สตาร์ชข้าวพันธุ์ต่างๆมี Pasting temperature ต่างกันเนื่องจากอะไมโลสในสตาร์ชสามารถรวมตัวเป็นสารเชิงซ้อนกับไขมัน ทำให้โมเลกุลอะไมโลสมีโครงสร้างแบบเกลียวม้วนที่มีความแข็งแรงมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารละลายสตาร์ชในกลุ่มที่มีอะไมโลสสูงจึงเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่าสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ (Jacquier *et al.*, 2006)

สำหรับความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) พบว่าสตาร์ชข้าวเจ้ามีค่าต่ำกว่าสตาร์ชในกลุ่มข้าวเหนียว (1482.66-1533.33 และ 2178.00-2613.33 เซนติพอยด์ ตามลำดับ) โดยในกลุ่มของสตาร์ชข้าวเจ้าพบว่าสตาร์ชข้าว KN มี Peak viscosity สูงที่สุด ขณะที่สตาร์ชข้าว BWR-96044

มีค่าสูงที่สุดในกลุ่มสตาρχข้าวเหนียว จากการทดลองพบว่าสตาρχข้าวเหนียวมี Peak viscosity สูงกว่าสตาρχข้าวเจ้า และมีความสอดคล้องกับกำลังการพอง เพราะสตาρχข้าวเหนียวมีปริมาณอะไมโลเพคตินสูงกว่าสตาρχข้าวเจ้า ซึ่งโครงสร้างของอะไมโลเพคตินมีกิ่งก้านสาขามาก ทำให้เม็ดสตาρχพองตัวได้ดีกว่า นอกจากนี้อะไมโลสในสตาρχอาจรวมตัวกับไขมันเป็นอะไมโลสไลปิด คอมเพล็กซ์ส่งผลให้ความหนืดของสตาρχต่ำ สังเกตได้จากสตาρχ SY ที่มีค่า Peak viscosity ต่ำสุดในกลุ่มข้าวเจ้า ทั่วๆไปควรจะมีความหนืดสูงที่สุด เพราะมีอะไมโลสต่ำ แต่เนื่องจากมีปริมาณไขมันสูงจึงอาจทำให้มี Peak viscosity ต่ำ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าสตาρχข้าว HK และ SY มีค่าดังกล่าวไม่ต่างกัน

สำหรับ Trough viscosity ซึ่งเป็นความหนืดต่ำสุดหลังจากลดอุณหภูมิพร้อมกับให้แรงเฉือน พบว่าสตาρχข้าวเจ้ามีค่า Trough viscosity ต่ำกว่าสตาρχข้าวเหนียว (783.66-901.66 และ 1037.66-1318.66 เซนติพอยต์ ตามลำดับ) สตาρχข้าว SY มีค่า Trough viscosity น้อยที่สุดในขณะที่สตาρχ BWR-96044 มีค่า Trough viscosity สูงที่สุด การที่สตาρχข้าวเหนียวมีค่า Trough viscosity สูงกว่าสตาρχข้าวเจ้า เนื่องจากสตาρχข้าวเหนียวมีอะไมโลเพคตินสูงกว่าสตาρχข้าวเหนียว ส่งผลให้สตาρχข้าวเหนียวมีความสามารถในการจับกับน้ำได้ดีกว่าสตาρχข้าวเจ้า ความต่างระหว่างความหนืดสูงที่สุดกับความหนืดต่ำสุด สามารถบอกถึงความทนต่อแรงกวน (Breakdown viscosity) ซึ่งอยู่ในช่วง 631.66-1382.33 เซนติพอยต์ สตาρχข้าวเจ้ามีความทนต่อแรงกวนมากกว่าสตาρχข้าวเหนียว ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าสตาρχ HK และ KN มีความทนต่อแรงกวนสูงและไม่แตกต่างกัน ($p < 0.05$) การเปลี่ยนแปลงของ Breakdown viscosity ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสตาρχ เพราะสตาρχที่มีอะไมโลสสูง จะมีความแข็งแรง ทนทานต่อแรงกวนได้ดี จึงทำให้ค่า Breakdown viscosity ต่ำ (Jane and Chen, 1993)

เมื่อลดอุณหภูมิลงจาก 95 องศาเซลเซียสไปเป็น 50 องศาเซลเซียส สตาρχจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นเรียกว่า Final viscosity จากการศึกษาค้นคว้าพบว่า Final viscosity ของข้าวทุกพันธุ์มีความแตกต่างทางสถิติ โดยสตาρχข้าวเจ้ามีค่า Final viscosity อยู่ในช่วง 1395.33-1858.33 เซนติพอยต์ และสตาρχข้าวเหนียวมีค่า Final viscosity ต่ำกว่าสตาρχข้าวเจ้าคืออยู่ในช่วง 1223.66-1592.66 เซนติพอยต์ สตาρχในกลุ่มข้าวเจ้าพบว่า HK มีค่า Final viscosity สูงที่สุด ส่วนสตาρχ BWR-96044 มีค่า Final viscosity สูงที่สุดในกลุ่มข้าวเหนียว ความแตกต่างระหว่างค่า Final viscosity กับ Trough viscosity จะบอกถึงความคงตัวของสตาρχเรียกว่า Setback viscosity พบว่าสตาρχข้าวเจ้ามีค่า Setback viscosity สูงกว่าสตาρχข้าวเหนียว ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าสตาρχข้าว RWR-96060 BWR-96025 และ KR มีค่า Setback ไม่แตกต่างกัน ($p < 0.05$) โดยค่า Final viscosity และค่า Setback viscosity มีความสัมพันธ์กันในเชิงบวก ($r = 0.853$) นอกจากนี้ค่า Final

viscosity และค่า Setback viscosity ยังมีความสัมพันธ์กับปริมาณของอะไมโลส ($r = 0.757$ และ 0.970 ตามลำดับ) ปัจจัยที่ส่งผลให้เกิด Final viscosity และ Setback viscosity คือเมื่อลดอุณหภูมิของอะไมโลสที่ถูกปลดปล่อยจะเกิดการรวมตัวกันเรียกว่าการเกิดรีโทรกราเดชัน ทำให้โครงสร้างของเจลมีความแข็งแรงขึ้นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น สตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะมีโอกาสเกิดรีโทรกราเดชันสูง เนื่องจากมีปริมาณของอะไมโลสที่ถูกปลดปล่อยสูง (Vanderputte *et al.*, 2003)

จากการศึกษาความหนืดของแป้งข้าวขัดขาวและแป้งข้าวกล้องของข้าวมีสีทั้ง 8 ชนิด เปรียบเทียบกับสตาร์ชของข้าวดังกล่าวพบว่า แป้งข้าวกล้องและแป้งข้าวขัดขาวมีความหนืดที่แตกต่างจากสตาร์ชข้าวในทุกสายพันธุ์ (ตารางที่ 35 และ 36) ในข้าวพันธุ์เดียวกันพบว่า Peak viscosity ของแป้งข้าวกล้องและแป้งข้าวขัดขาวมีค่าต่ำกว่าสตาร์ชข้าว (447.66-1364.66 และ 1234.66-2376.33 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) สำหรับ Trough viscosity พบว่าแป้งข้าวกล้องและแป้งข้าวขัดขาวมีค่าเท่ากับ 28.00-321.00 และ 111.66-799.00 เซนติพอยด์ ตามลำดับ Final viscosity และ Setback ของแป้งข้าวขัดขาวสูงกว่าสตาร์ชข้าว (1403.66-2020.66 และ 171.33-908.33 เซนติพอยด์ ตามลำดับ) ขณะที่ของแป้งข้าวกล้องมีในช่วง 713.33-1269.33 และ 125.33-694.66 เซนติพอยด์ ตามลำดับ แป้งข้าวกล้องมี Pasting time ที่สูงกว่าแป้งข้าวขัดขาว (74.33-94.43 และ 75.10-91.46 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) จากการทดลองพบว่าองค์ประกอบทางเคมีเช่น ไขมัน โปรตีน เยื่อใยและเถ้า มีผลทำให้แป้งข้าวมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดต่างจากสตาร์ช จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าไขมัน เยื่อใยและเถ้า มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับค่า Trough viscosity และค่า Final viscosity ส่วนโปรตีนมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับ Pasting time และ Pasting temperature แต่มีความสัมพันธ์เชิงลบกับ Peak viscosity (ดังตารางภาคผนวกที่ 8) แป้งข้าวกล้องซึ่งมีไขมันและโปรตีนสูงจึงมีค่า Peak viscosity Trough viscosity Pasting temperature และ Pasting time ต่ำกว่าแป้งข้าวขัดขาวและสตาร์ช เนื่องจากโปรตีนมีส่วนในการขัดขวางการพองตัวทำให้ความหนืดลดลง นอกจากนี้ไขมันอาจรวมตัวกับอะไมโลสเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่แข็งแรงทำให้ใช้เวลาในการเกิดเจลในเซชันเพิ่มขึ้นและความหนืดของเจลลดลงด้วย ส่วนแป้งข้าวขัดมีค่า Final viscosity และ Setback viscosity สูงกว่าแป้งข้าวกล้องและสตาร์ช เพราะแป้งข้าวขัดขาวมีเยื่อใยน้อยแต่มีโปรตีนและไขมันที่หลงเหลือจากการขัดสี องค์ประกอบเหล่านี้มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับการเกิดรีโทรกราเดชัน

ตารางที่ 34 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ข้าว

พันธุ์ข้าว	Pasting viscosity (cP)						Peak time (min)	Pasting temperature (°C)
	Peak	Trough	Breakdown	Final	Setback			
HK	1498.33±16.19 ^{ab}	864.33±2.30 ^b	634.00±13.89 ^a	1858.33±12.74 ^b	994.00±13.89 ^f	4.60±0.00 ^e	79.81±0.40 ^c	
ข้าวเจ้า	1533.33±8.62 ^b	901.66±10.59 ^c	631.66±3.51 ^a	1789.00±7.54 ^b	887.33±18.14 ^e	4.55±0.04 ^e	79.55±0.43 ^c	
SY	1482.66±33.23 ^a	783.66±4.16 ^a	699.00±30.34 ^b	1395.33±5.03 ^c	611.66±9.01 ^d	4.57±0.04 ^e	80.61±0.53 ^d	
RWR 96060	2366.66±14.36 ^d	984.33±3.78 ^d	1382.33±13.05 ^e	1223.66±7.63 ^a	239.33±11.37 ^b	3.93±0.00 ^{cd}	72.71±0.02 ^b	
BWR 96025	2386.66±17.67 ^d	1037.66±7.63 ^c	1349.00±11.13 ^f	1262.33±10.21 ^b	224.66±3.05 ^b	3.84±0.04 ^{ab}	70.83±0.33 ^a	
ข้าวเหนียว	2449.66±17.21 ^c	1189.33±18.17 ^f	1260.33±2.08 ^d	1371.33±9.86 ^d	182.00±9.53 ^a	3.97±0.04 ^d	71.00±0.05 ^a	
KR	2178.00±13.22 ^c	1042.66±7.57 ^e	1135.33±16.50 ^c	1286.66±6.65 ^c	244.00±1.73 ^b	3.82±0.04 ^a	71.33±0.53 ^a	
BWR 96044	2613.33±30.89 ^f	1318.66±4.72 ^e	1294.66±32.71 ^f	1592.66±21.19 ^f	274.00±20.07 ^c	3.89±0.03 ^{bc}	72.75±0.05 ^b	

ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ($p < 0.05$)

ตารางที่ 35 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวกลีง

พันธุ์ข้าว	Pasting viscosity (cP)					Peak time (min)	Pasting temperature (°C)
	Peak	Trough	Breakdown	Final	Setback		
HK	575.66±0.57 ^b	547.00±2.00 ^b	28.66±2.51 ^b	1091.66±6.42 ^e	544.66±8.32 ^e	6.24±0.15 ^d	92.26±0.14 ^f
ข้าวเจ้า	717.33±3.78 ^d	574.66±9.01 ^c	142.66±12.66 ^d	1269.33±10.40 ^h	694.66±17.78 ^f	5.73±0.06 ^c	89.46±0.44 ^e
SY	447.66±2.08 ^a	419.66±1.15 ^a	28.00±3.00 ^b	932.00±4.00 ^c	512.33±3.05 ^d	7.00±0.00 ^e	94.43±0.41 ^g
RWR 96060	1281.00±10.58 ^g	960.00±5.19 ^g	321.00±5.56 ^f	1134.66±3.51 ^f	174.66±2.51 ^c	4.51±0.03 ^a	75.08±0.02 ^b
BWR 96025	814.66±8.73 ^f	777.33±11.93 ^f	37.33±3.21 ^b	956.66±10.06 ^d	179.33±2.51 ^c	5.71±0.03 ^c	76.71±0.02 ^e
ข้าวเหนียว	756.66±4.72 ^e	699.33±5.13 ^e	57.33±0.57 ^c	841.66±10.50 ^b	142.33±5.68 ^b	5.22±0.37 ^b	75.06±0.02 ^b
KR	1364.66±17.50 ^h	1058.66±12.66 ^h	306.00±5.29 ^e	1244.33±13.01 ^g	185.66±1.52 ^c	4.62±0.04 ^a	74.33±0.07 ^a
BWR 96044	605.00±3.00 ^c	588.00±2.64 ^d	17.00±1.00 ^a	713.33±3.21 ^a	125.33±0.57 ^a	6.26±0.24 ^d	78.10±0.43 ^d

ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ($p < 0.05$)

ตารางที่ 36 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวขัดขาว

พันธุ์ข้าว	Pasting viscosity (cP)					Peak time (min)	Pasting temperature (°C)
	Peak	Trough	Breakdown	Final	Setback		
HK	1242.00±12.12 ^a	1130.33±14.84 ^a	111.66±4.93 ^a	1756.33±7.76 ^d	626.00±17.05 ^e	6.40±0.07 ^f	88.16±0.02 ^f
ข้าวเจ้า	1473.33±9.60 ^b	1183.00±17.69 ^b	290.33±8.08 ^b	1903.33±11.59 ^e	720.33±27.30 ^f	6.20±0.07 ^e	83.20±0.00 ^e
SY	1234.66±10.78 ^a	1112.33±5.13 ^b	122.33±12.34 ^a	2020.66±7.76 ^e	908.33±6.65 ^e	6.95±0.04 ^e	91.46±0.02 ^e
RWR 96060	2376.33±15.17 ^e	1577.33±7.37 ^e	799.00±9.84 ^e	1896.66±5.77 ^e	319.33±2.08 ^d	4.40±0.00 ^b	75.10±0.05 ^a
BWR 96025	1990.66±14.64 ^e	1683.00±23.81 ^f	307.66±37.44 ^b	1970.00±3.46 ^f	287.00±26.21 ^c	5.35±0.04 ^d	76.98±0.49 ^b
ข้าวเหนียว	1644.00±28.51 ^e	1232.33±14.01 ^e	411.66±15.69 ^c	1403.66±17.21 ^a	171.33±3.21 ^a	4.53±0.00 ^c	77.56±0.02 ^c
KR	2153.00±10.81 ^f	1354.00±23.81 ^d	799.00±21.63 ^c	1596.33±19.85 ^e	242.33±4.04 ^b	4.33±0.00 ^a	77.58±0.05 ^c
BWR 96044	1876.66±18.33 ^d	1343.00±28.58 ^d	533.66±34.81 ^d	1541.00±10.81 ^b	198.00±19.92 ^a	4.53±0.00 ^c	79.20±0.05 ^d

ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ($p < 0.05$)

4.3.3.4 การเกิดเจลาทีโนเซชัน

ช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลาทีโนเซชันของกลุ่มสตาร์ชข้าวเจ้าอยู่ในช่วง 69.76-81.33 องศาเซลเซียส โดย T_0 และ T_c ไม่แตกต่างกันทางสถิติ สำหรับค่า ΔH ในกลุ่มข้าวเจ้าอยู่ในช่วง 11.57-14.36 จูลต่อกรัม จากการทดลองพบว่าสตาร์ชข้าว HK มี ΔH ต่ำกว่าข้าว KN และ SY อย่างมีนัยสำคัญ เพราะจากมีปริมาณอะไมโลสสูงกว่าข้าวอีกสองพันธุ์ (ตารางที่ 37) ในกลุ่มสตาร์ชข้าวเหนียวพบว่าช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลาทีโนเซชันอยู่ในช่วง 59.36-80.85 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าของสตาร์ชข้าวเจ้า โดยเฉพาะ T_0 และ T_c มีค่าต่ำกว่าข้าวเจ้า ขณะที่ T_c มีค่าใกล้เคียงกับสตาร์ชข้าวเจ้า ส่งผลให้ค่า T_0-T_c สูงกว่าสตาร์ชข้าวเจ้า สำหรับ ΔH ของสตาร์ชข้าวเหนียวมีค่าอยู่ในช่วง 13.47-14.51 จูลต่อกรัมและไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ปัจจัยที่อาจส่งผลให้สตาร์ชข้าวมีอุณหภูมิการเกิดเจลาทีโนเซชันต่างกัน คือ ปริมาณ อะไมโลส ความเป็นผลึกของสตาร์ช และปริมาณไขมัน จากการศึกษาของ Hoover and Manuel (1996) พบว่าความเป็นผลึกของสตาร์ชจะอยู่ในส่วนของสายโซ่สายสั้นของอะไมโลเพคติน ดังนั้นสตาร์ชที่มีสัดส่วนของอะไมโลเพคตินสูง อย่างเช่นสตาร์ชข้าวเหนียวมีค่าความเป็นผลึกสูงกว่าสตาร์ชข้าวเจ้า จึงทำให้ ΔH ที่ใช้ในการเกิดเจลาทีโนเซชันมากกว่า เนื่องจากต้องการพลังงานความร้อนสูงเพื่อทำลายส่วนที่เป็นผลึกเหล่านั้น และจากการศึกษาของ Noosuk *et al.* (2005) และ Jacquier *et al.* (2006) พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลาทีโนเซชันของสตาร์ชจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอะไมโลสสูงขึ้นเพราะอะไมโลสเป็นโครงสร้างสามารถเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับไขมันได้ ทำให้เกิดโมเลกุลแบบเกลียวม้วนซึ่งต้องใช้พลังงานสูงในการทำลายพันธะในการเกิดเจลาทีโนเซชัน นอกจากนี้ปริมาณไขมันก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ ΔH สูง สังกัดได้จากสตาร์ชข้าว SY และ KN ที่มีค่า ΔH สูงกว่าสตาร์ชข้าว HK ทั้งที่ความจริงแล้วเป็นข้าวเจ้าเหมือนกัน เพราะว่สตาร์ชข้าว SY และ KN มีปริมาณไขมันสูง ส่งผลให้เกิดอะไมโลสไลปิดคอมเพล็กซ์ ทำให้ต้องใช้ ΔH สูง

ตารางที่ 37 อุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันและค่าเอนทาลปีของสตาร์ชข้าวมีสี

พันธุ์ข้าว	T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	$T_o - T_c$ (°C)	ΔH (J/g)	
ข้าวเจ้า	HK	69.76±0.27 ^d	74.51±0.51 ^d	79.33±0.80 ^b	9.57	11.57±0.30 ^a
	KN	70.23±0.24 ^d	74.70±0.58 ^d	80.17±0.59 ^b	9.94	14.20±0.96 ^b
	SY	70.76±0.39 ^d	76.94±0.14 ^c	81.33±0.35 ^b	10.57	14.36±1.85 ^b
ข้าวเหนียว	RWR 96060	59.36±0.27 ^a	65.56±0.36 ^a	71.94±0.26 ^a	12.58	14.51±0.35 ^b
	BWR 96025	62.60±0.39 ^c	68.84±0.51 ^c	79.40±2.46 ^b	16.80	13.64±0.20 ^b
	CMP	62.74±1.68 ^c	69.34±2.00 ^c	80.36±1.22 ^b	17.62	13.47±0.10 ^b
	KR	62.60±0.39 ^c	68.86±0.51 ^c	79.40±2.46 ^b	16.80	14.01±0.43 ^b
	BWR 96044	61.20±0.05 ^b	67.03±0.63 ^b	80.85±0.51 ^b	19.65	13.87±0.49 ^b

ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ($p < 0.05$)

4.3.3.5 การเกิดรีโทรกราเดชัน

ช่วงอุณหภูมิของการเกิดรีโทรกราเดชันของกลุ่มสตาร์ชข้าวเจ้าอยู่ในช่วง 48.30-66.52 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 38) สำหรับ ΔH อยู่ในช่วง 5.16-5.91 จูลต่อกรัม จากการทดลองพบว่าสตาร์ชข้าวเจ้ามี ΔH ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ข้าวเจ้ามีระดับการเกิดรีโทรกราเดชันในช่วง 35.94-56.26 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 39) ในกลุ่มสตาร์ชข้าวเหนียวพบว่าช่วงอุณหภูมิของการเกิดรีโทรกราเดชันอยู่ในช่วง 48.85-65.94 องศาเซลเซียส สำหรับ ΔH อยู่ในช่วง 2.98-3.66 จูลต่อกรัม ข้าวเหนียวมีระดับการเกิดรีโทรกราเดชันในช่วง 21.52-26.13 เปอร์เซ็นต์ ผลทางสถิติพบว่าสตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชข้าวเหนียวมี T_o และ T_p ไม่แตกต่างกัน ขณะที่ T_c ของสตาร์ชข้าวเหนียวต่ำกว่าสตาร์ชข้าวเจ้า ส่งผลให้ค่า $T_o - T_c$ ต่ำกว่า สำหรับ ΔH ของสตาร์ชข้าวเหนียวไม่แตกต่างกัน

การเกิดรีโทรกราเดชันมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับค่า Final viscosity และค่า Setback viscosity ซึ่งอัตราการเกิดรีโทรกราเดชันขึ้นกับปริมาณของอะไมโลส ขนาดของโมเลกุล และปริมาณของไขมันที่มีในสตาร์ช จากการศึกษาของ Fredrickson *et al.* (1998) และ Chang and Lin (2007) พบว่าปริมาณอะไมโลสมีผลในเชิงบวกต่อ ΔH เนื่องจากสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสสูงอาจจะมีอัตราการรวมตัวกันของโมเลกุลของอะไมโลส หลังจากการเกิดเจลลิตีในเซชันสูง ทำให้อัตราการเกิดรีโทรกราเดชันเพิ่มขึ้น เป็นที่น่าสังเกตว่าสตาร์ชข้าวเหนียวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ แต่มีปริมาณไขมันสูง เช่น สตาร์ชข้าวพันธุ์ KR มีค่า ΔH ที่สูง เพราะสตาร์ช KR มีปริมาณไขมันสูง

และอาจทำปฏิกิริยากับอะไมโลสกลายเป็นอะไมโลสไลปิโดคอมเพล็กซ์ที่มีโครงสร้างที่แข็งแรง
ต้องใช้อุณหภูมิและพลังงานความร้อนสูงในการทำลาย

ตารางที่ 38 อุณหภูมิในการเกิดรีโทรกราเดชันและค่าเอนทัลปีของสตาร์ชข้าวมีสี

พันธุ์ข้าว	T _o (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	Range (°C)	ΔH (J/g)	
ข้าวเจ้า	HK	48.30±0.02	54.60±0.65	66.52±0.52 ^b	18.22	6.51±0.20 ^c
	KN	48.40±1.32	55.03±0.40	67.29±1.53 ^b	18.89	5.91±0.68 ^{bc}
	SY	48.52±1.15	55.10±0.87	66.69±1.32 ^b	18.17	5.16±0.15 ^b
ข้าวเหนียว	RWR 96060	48.89±1.04	54.34±0.96	63.64±2.23 ^{ab}	14.75	3.28±0.23 ^a
	BWR 96025	48.85±1.60	54.36±1.43	61.96±4.22 ^a	13.11	3.47±1.17 ^a
	CMP	49.45±0.84	54.60±1.18	65.94±0.24 ^b	16.49	3.38±0.24 ^a
	KR	48.42±0.04	54.15±0.32	64.29±0.51 ^{ab}	15.87	3.66±0.44 ^a
	BWR 96044	49.07±1.35	53.94±0.18	63.69±1.51 ^{ab}	14.62	2.98±0.82 ^a

ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ($p < 0.05$)

ผลการศึกษาความคงทนต่อการแช่แข็งและการละลายโดยวัดปริมาณน้ำที่ถูกขับออกจากเจล พบว่าสตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชข้าวเหนียวอยู่ในช่วง 36.67-49.76 และ 27.43-28.39 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 39) สตาร์ชของกลุ่มข้าวเจ้าของข้าว HK มีการขับน้ำออกจากเจลแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับสตาร์ชข้าว SY และ KN ส่วนสตาร์ชข้าวเหนียวไม่มีความแตกต่างกัน ผลการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของเจลด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส พบว่าความแข็งของเจลของสตาร์ชข้าวเจ้าและข้าวเหนียวอยู่ในช่วง 0.594-0.888 และ 0.064-0.149 กิโลกรัมตามลำดับ และมีค่าความคงตัวของเจลอยู่ในช่วง 3.059-4.874 และ 0.349-0.636 กิโลกรัมต่อวินาที ตามลำดับ และพบว่าค่าความแข็งแรงและค่าความคงตัวของเจลจากสตาร์ชข้าวทุกพันธุ์แตกต่างกัน

การขับน้ำออกจากเจล ค่าความแข็งแรงของเจล และค่าความคงตัวของเจล เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับการระดับเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ช และมีความสัมพันธ์กับอะไมโลส กล่าวคือ หลังจากการเกิดเจลในเซชัน โมเลกุลอะไมโลสที่ถูกปลดปล่อยจากเม็ดสตาร์ชจะเกิดการเรียงตัวกันใหม่ (รีโทรกราเดชัน) เกิดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงขึ้นอีกครั้ง สตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะมีความแข็งแรงของเจล และมีค่าความคงตัวของเจลสูงด้วย ในการเกิดการรวมตัวกัน

ใหม่ของโมเลกุลของอะไมโลส หลังการเกิดเจลาทิไนเซชันนี้จะมีการขับน้ำออกมา 1 โมเลกุล เพื่อให้สายโมเลกุลของอะไมโลสได้ทำพันธะไฮโดรเจนด้วยกัน ซึ่งหากสตาร์ชมีปริมาณอะไมโลสสูง การขับน้ำจะสูงไปด้วย ทำให้สตาร์ชข้าวเจ้ามีการขับน้ำสูงกว่าสตาร์ชข้าวเหนียว (Perera and Hoover, 1999; Sodhi and Singh, 2003)

ตารางที่ 39 ระดับการเกิดรีโทรกราเดชัน การขับน้ำออกจากเจลและความคงตัวของเจลจากสตาร์ชข้าวมีสี

พันธุ์ข้าว	ระดับการเกิดรีโทรกราเดชัน (%)	การขับน้ำ* (%)	เนื้อสัมผัสของเจล**		
			ความแข็ง (kg)	ความคงตัว (kg.s)	
ข้าวเจ้า	HK	56.26	49.76±0.46 ^c	0.888±0.006 ^e	4.874±0.011 ^h
	KN	41.60	37.43±1.00 ^b	0.783±0.008 ^f	3.880±0.022 ^e
	SY	35.94	36.67±0.88 ^b	0.594±0.004 ^c	3.059±0.012 ^f
ข้าวเหนียว	RWR 96060	22.59	28.06±1.60 ^a	0.104±0.000 ^c	0.485±0.006 ^d
	BWR 96025	25.43	27.52±0.22 ^a	0.070±0.002 ^a	0.382±0.011 ^b
	CMP	25.08	28.39±0.26 ^a	0.149±0.006 ^d	0.636±0.007 ^c
	KR	26.13	27.43±0.11 ^a	0.064±0.005 ^a	0.349±0.002 ^a
	BWR 96044	21.52	27.84±0.13 ^a	0.089±0.001 ^b	0.442±0.001 ^c

*ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

**ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 5 ซ้ำ

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ($p < 0.05$)

4.4 การศึกษาคุณภาพในการหุงต้ม

การศึกษาคูณภาพการหุงต้มของข้าวกล้องและข้าวขัดขาวประกอบด้วย การยืดตัว และการขยายปริมาตรของเมล็ดข้าว มีการเตรียมตัวอย่างข้าวเพื่อวัดคุณภาพดังกล่าว คือตัวอย่างข้าวเจ้าเตรียมโดยการหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า ในขณะที่ข้าวเหนียวจะมีการเตรียมโดยการนึ่งด้วยไอน้ำ ผลการศึกษามีดังต่อไปนี้

4.4.1 การยืดตัวของเมล็ดข้าว

ผลศึกษาอัตราการยืดตัวของข้าวกล้องดังตารางที่ 40 พบว่าข้าวเจ้ากล้องมีอัตราการยืดตัวในช่วง 1.00-1.04 และไม่แตกต่างกันทางสถิติ ส่วนข้าวเหนียวกล้องมีอัตราการยืดตัวในช่วง 1.08-1.14 และแตกต่างจากข้าวเจ้าอย่างมีนัยสำคัญ และข้าวกล้องพันธุ์ RWR-96060 CMP และ BWR-96044 มีอัตราการยืดตัวที่ไม่แตกต่างกันเช่นกัน สำหรับข้าวขัดขาวพบว่าข้าวเจ้ามีอัตราการยืดตัวในช่วง 1.44-1.57 โดยข้าว HK มีการยืดตัวสูงที่สุด และข้าวเหนียวมีอัตราการยืดตัวในช่วง 1.40-1.62 และข้าว CMP มีอัตราการยืดตัวสูงสุด โดยสูงกว่าพันธุ์ RWR-96060 และ BWR-96025 แต่ไม่แตกต่างกับพันธุ์ KR และ BWR-96044

ในขณะที่หุงต้มอะไมโลสในสตาρχข้าวอาจทำปฏิกิริยากับไขมัน เป็นอะไมโลสไลปิดคอมเพล็กซ์ ทำให้การเกิดเจลลิตีในเซชันไม่สมบูรณ์ เมล็ดข้าวดูดซึมน้ำได้น้อยลง จึงมีการยืดตัวต่ำซึ่งสังเกตได้จากข้าวกล้องพันธุ์ BWR-96044 และข้าวที่มีปริมาณโปรตีนสูงจะมีอัตราการยืดตัวต่ำด้วย เพราะโปรตีนในเมล็ดข้าวอาจเกิดการแข่งขันกับสตาρχในการดูดซับน้ำขณะหุงต้ม ซึ่งเป็นการขัดขวางการเกิดเจลลิตีในเซชัน (สุพิศา, 2547) การขัดสีทำให้เมล็ดข้าวมีปริมาณไขมันและโปรตีนลดลง ข้าวขัดขาวจึงมีการยืดตัวมากกว่าข้าวกล้อง

ตารางที่ 40 การยืดตัวของเมล็ดข้าวมีสี

	พันธุ์ข้าว	การยืดตัวของเมล็ด	
		ข้าวกล้อง	ข้าวขัดขาว
ข้าวเจ้า	HK	1.02±0.05 ^a	1.57±0.19 ^b
	KN	1.00±0.07 ^a	1.44±0.06 ^a
	SY	1.04±0.04 ^{ab}	1.51±0.10 ^{ab}
ข้าวเหนียว	RWR 96060	1.08±0.05 ^b	1.40±0.05 ^a
	BWR 96025	1.14±0.07 ^c	1.42±0.06 ^a
	CMP	1.08±0.04 ^b	1.62±0.08 ^b
	KR	1.14±0.03 ^c	1.59±0.20 ^b
	BWR 96044	1.09±0.04 ^b	1.59±0.05 ^b

ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนั้นแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ($p < 0.05$)

4.4.2 การขยายปริมาตรหลังการหุง

การขยายปริมาตรของข้าวหลังการหุงของกลุ่มข้าวเจ้ากล้อง (ตารางที่ 41) อยู่ในช่วง 1.76-1.80 ข้าวพันธุ์ SY และ HK มีการขยายปริมาตรหลังการหุงมากที่สุดแต่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ สำหรับข้าวเหนียวกล้องมีการขยายปริมาตรหลังการหุงในช่วง 0.99-1.09 และข้าวพันธุ์ BWR-96044 มีการขยายปริมาตรหลังการหุงมากที่สุด ข้าวเหนียวพันธุ์ RWR-96060 BWR-96025 และ CMP มีการขยายปริมาตรหลังการหุงไม่แตกต่างกัน สำหรับการขยายปริมาตรหลังการหุงของข้าวขัดขาวพบว่าข้าวเจ้าขัดขาวมีการขยายปริมาตรอยู่ในช่วง 1.86-1.91 และไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ นอกจากนี้กลุ่มข้าวเหนียวขัดขาวมีการขยายปริมาตรที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติโดยอยู่ในช่วง 1.08-1.10 แต่มีค่าต่ำกว่ากลุ่มของข้าวเจ้าอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสสารข้าวเหนียวมีองค์ประกอบของสายอะไมโลเพคตินที่มีสายยาวมากกว่าสสารข้าวเจ้า ซึ่งอาจไปเกาะเกี่ยวกับโครงสร้างอะไมโลสเกิดเป็นกลุ่มคลัสเตอร์ ซึ่งมีโครงสร้างเป็นเกลียวคู่ภายในโครงสร้างนี้มีความแข็งแรงมาก ข้าวเหนียวจึงมีการขยายปริมาตรหลังการหุงน้อยกว่าข้าวเจ้า (Singh *et al.*, 2003)

จากการทดลองพบว่าข้าวขัดขาวมีการขยายปริมาตรมากกว่าข้าวกล้อง เพราะข้าวกล้องมีปริมาณไขมัน โปรตีน และเยื่อใยสูงกว่า ซึ่งในขณะที่หุงต้มเยื่อหุ้มเมล็ดในข้าวกล้องจะเป็นตัวขัดขวางไม่ให้น้ำเข้าไปภายในเมล็ดได้ เมล็ดข้าวกล้องจึงเกิดเจลลิตินในเซชันได้ยากและเกิดได้ไม่สมบูรณ์ สสารภายในเมล็ดพองตัวไม่เต็มที่ จึงส่งผลให้มีการขยายปริมาตรน้อย นอกจากนี้ไขมัน

และโปรตีนที่เชื่อมเมล็คของข้าวกล้องมีผลต่อการขยายปริมาตรเช่นกัน เพราะไขมันอาจทำปฏิกิริยากับอะไมโลสในขณะที่มีการหุงต้ม และโปรตีนในเมล็คข้าวอาจเกิดการแข่งขันกับสตาร์ชในการดูดซับน้ำขณะหุงต้ม เมล็ดข้าวจึงมีการขยายปริมาตรต่ำ การขัดสีช่วยให้ข้าวมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากไปลดปริมาณไขมัน โปรตีน เยื่อใยและเถ้าในเมล็คข้าว

ตารางที่ 41 การขยายปริมาตรหลังการหุงสุก

ตัวอย่างข้าว		การขยายปริมาตร	
		ข้าวกล้อง	ข้าวขัดขาว
ข้าวเจ้า	HK	1.80±0.05 ^c	1.91±0.00 ^b
	KN	1.76±0.02 ^c	1.88±0.03 ^b
	SY	1.80±0.05 ^c	1.86±0.16 ^b
ข้าวเหนียว	RWR 96060	0.99±0.09 ^a	1.08±0.04 ^a
	BWR 96025	1.07±0.02 ^{ab}	1.10±0.02 ^a
	CMP	1.07±0.03 ^{ab}	1.08±0.03 ^a
	KR	1.08±0.02 ^b	1.10±0.01 ^a
	BWR 96044	1.09±0.04 ^b	1.17±0.13 ^a

ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ($p < 0.05$)

4.5 การศึกษาคุณภาพในการรับประทาน

คุณภาพในการรับประทาน เช่น ลักษณะปรากฏ การเกาะตัว ความแข็ง ความนุ่ม เป็นคุณสมบัติที่สำคัญ ที่ส่งผลต่อความชอบของผู้บริโภค จากการศึกษาพบว่า ข้าวกล้องในกลุ่มข้าวเจ้ามีความแข็งและแรงที่ใช้ในการเคี้ยวอยู่ในช่วง 5.66-10.35 กิโลกรัมและ 33.24-65.14 กิโลกรัมต่อวินาทีตามลำดับ และข้าวเหนียวกล้องมีความแข็งและแรงที่ใช้ในการเคี้ยวอยู่ในช่วง 6.17-12.03 กิโลกรัมและ 36.25-66.17 กิโลกรัมต่อวินาที ข้าวกล้อง HK มีค่าความแข็งและแรงที่ใช้ในการเคี้ยวสูงที่สุดในกลุ่มข้าวเจ้า และข้าวกล้อง RWR-96060 มีค่าความแข็งและแรงที่ใช้ในการเคี้ยวสูงที่สุดในกลุ่มข้าวเหนียว สังเกตเห็นว่ากลุ่มข้าวเหนียวกล้องมีความแข็งสูงกว่ากลุ่มข้าวเจ้ากล้อง อธิบายได้ว่าข้าวเหนียวอาจมีองค์ประกอบของอะไมโลเพคตินสายยาว อาจไปเกาะเกี่ยวกับไขมันได้เช่นเดียวกับอะไมโลส ส่งผลให้ความสามารถในการพองตัวของสตาร์ชต่ำ ข้าวเหนียวจึงมีเนื้อสัมผัสแข็งกว่าข้าวเจ้า (Ong and Blanshard, 1995; Singh *et al.*, 2003)

ผลการศึกษาค่าความแข็งและแรงที่ใช้ในการเคี้ยวของข้าวขัดขาว พบว่ากลุ่มข้าวเจ้ามีค่าความแข็งและแรงที่ใช้ในการเคี้ยวในช่วง 2.24-2.91 กิโลกรัมและ 14.29-19.82 กิโลกรัมต่อวินาที และข้าวเหนียวมีค่าความแข็งและแรงที่ใช้ในการเคี้ยวอยู่ในช่วง 1.75-2.23 กิโลกรัมและ 13.38-16.42 กิโลกรัมต่อวินาที ข้าวขัดขาวแต่ละพันธุ์มีค่าความแข็งและแรงที่ใช้ในการเคี้ยวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยอะไมโลสเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ข้าวแต่ละพันธุ์มีเนื้อสัมผัสต่างกัน พบว่าข้าวอะไมโลสสูงจะมีเนื้อสัมผัสแข็งกว่าข้าวอะไมโลสต่ำ (Singh *et al.*, 2003) โดยสังเกตได้จากข้าวเจ้าพบว่าข้าว SY มีความอ่อนนุ่มกว่าข้าว HK และ KN เพราะข้าว SY มีปริมาณอะไมโลสน้อยที่สุดในกลุ่มข้าวเจ้า นอกจากนี้ข้าวขัดขาวทุกพันธุ์มีความแข็งและแรงที่ใช้ในการเคี้ยวที่ต่ำกว่าข้าวกล้องและแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งปัจจัยที่ทำให้ข้าวขัดขาวมีเนื้อสัมผัสต่างจากข้าวกล้อง คือ ไขมัน เยื่อใย โปรตีนและเถ้า โดยในระหว่างการหุงเชื่อมเมล็ดเป็นตัวขวางการดูดซึมน้ำของเมล็ดข้าว และไขมันอาจไปเกาะเกี่ยวกับอะไมโลส ส่วนโปรตีนก็แย่งการดูดซึมน้ำของสตาร์ชทำให้เนื้อสัมผัสของข้าวกล้องแข็งกว่าข้าวขัดขาว ดังนั้นการขัดสีจึงส่งผลให้เมล็ดข้าวมีความอ่อนนุ่มมากขึ้น (Dalai and Tongta, 2008) นอกจากนี้ความแข็งและความเคาะติดของข้าวมีความสัมพันธ์กับค่า Final viscosity ($r = 0.737$) เพราะความแข็งและแรงที่ใช้ในการเคี้ยวของข้าวและค่า Final viscosity น่าจะเป็นผลมาจากการเกิดรีโทรกราเดชันเช่นเดียวกันนั่นเอง

ตารางที่ 42 ความแข็งและค่าแรงที่ใช้เกี่ยวข้าวหุงสุกจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสน้ำ

พันธุ์ข้าว	ข้าวกล้อง		ข้าวขัดขาว		
	ความแข็ง (kg)	แรงเกี่ยว (kg.s)	ความแข็ง (kg)	แรงเกี่ยว (kg.s)	
ข้าวเจ้า	HK	10.35±0.09 ^d	65.14±0.76 ^e	2.91±0.09 ^f	19.82±1.04 ^d
	KN	7.90±0.20 ^c	48.64±3.21 ^d	2.46±0.07 ^e	16.81±0.59 ^c
	SY	5.66±0.36 ^a	33.24±2.14 ^a	2.24±0.10 ^d	14.29±1.07 ^{ab}
ข้าวเหนียว	RWR 96060	12.03±0.20 ^e	66.17±3.83 ^e	2.23±0.05 ^d	16.42±1.50 ^{bc}
	BWR 96025	7.40±0.05 ^{bc}	40.81±0.69 ^c	2.19±0.06 ^{cd}	15.75±0.60 ^{bc}
	CMP	11.35±0.78 ^e	64.82±1.36 ^e	1.75±0.10 ^a	13.38±0.95 ^a
	KR	6.17±0.56 ^a	36.25±3.30 ^{ab}	1.88±0.10 ^{ab}	15.03±0.87 ^{abc}
	BWR 96044	7.07±0.52 ^b	39.79±2.20 ^{bc}	2.04±0.10 ^{bc}	16.27±1.77 ^{bc}

ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 5 ซ้ำ

ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ($p < 0.05$)

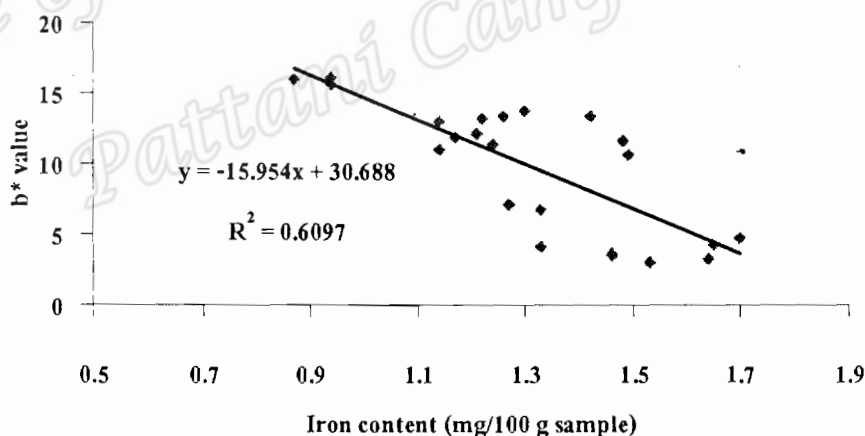
Prince of Songkhla University
Pattani Campus

4.6 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพและเคมี คุณภาพในการหุงต้ม การแปรรูป และการรับประทานของข้าวพื้นเมืองมีสี

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพและเคมี คุณภาพในการหุงต้ม การแปรรูป และการรับประทานของข้าวพื้นเมืองมีสี สามารถทำได้โดยนำผลการทดลองที่ได้ไปหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆของข้าวด้วยวิธี Pearson Correlation ที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์ (ได้ผลดังตารางภาคผนวกที่ 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10) จากนั้นเลือกความสัมพันธ์ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ที่มากกว่า 0.8 ไปหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนั้นๆได้ผลดังต่อไปนี้

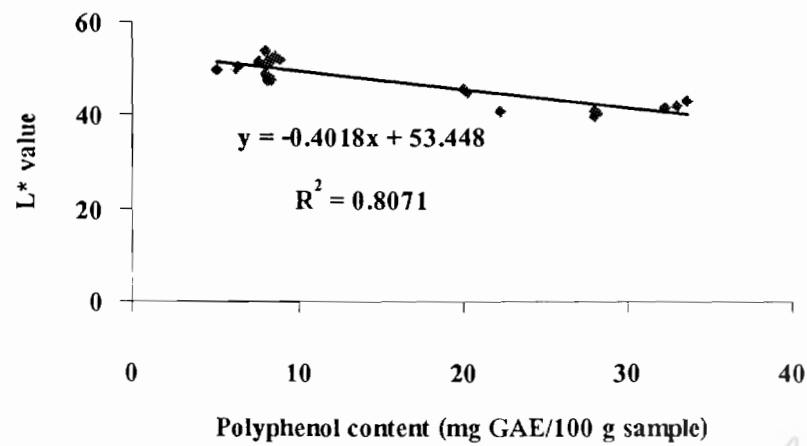
4.6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีกับปริมาณธาตุเหล็ก โพลีฟีนอลและความสามารถในการกำจัดอนุมูล ABTS^{•+}

ผลการทดลองพบว่าปริมาณธาตุเหล็กและค่า b^* ของเมล็ดข้าวกล้องมีความสัมพันธ์แบบสมการเส้นตรงในเชิงลบ ซึ่งมีสมการคือ $y = -15.95x + 30.68$ และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.60 กล่าวคือหากเมล็ดข้าวกล้องมีสีม่วงคล้ำมากขึ้น ก็จะพบธาตุเหล็กสูงขึ้นด้วย ดังรูปที่ 16

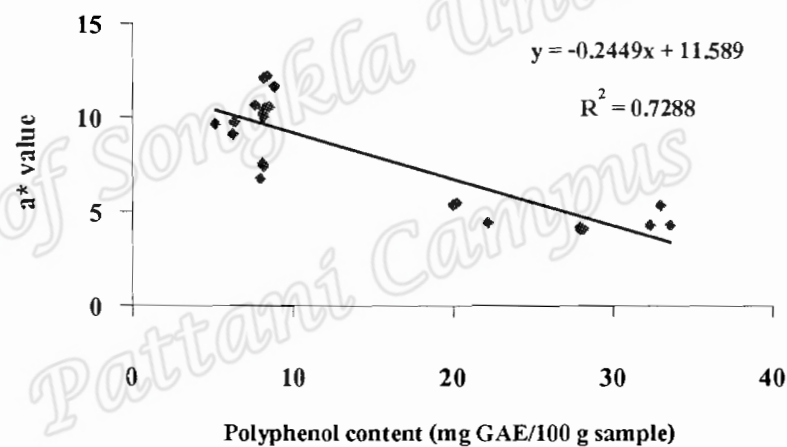


รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่าง b^* และปริมาณธาตุเหล็กของข้าวมีสี

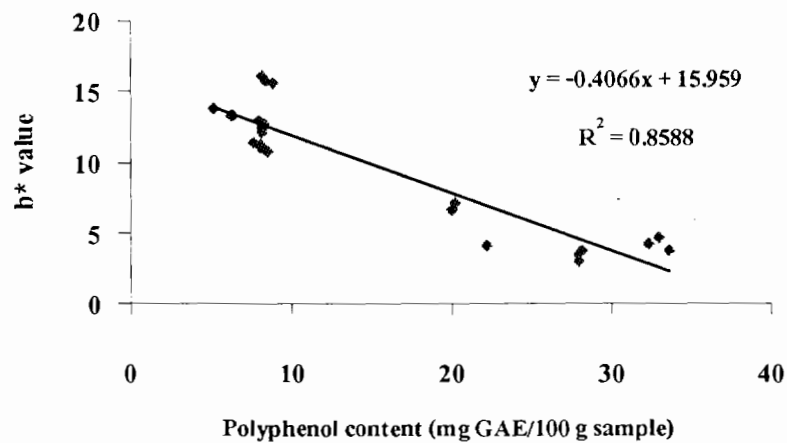
นอกจากนี้ค่า L^* a^* และ b^* ของเมล็ดข้าวกล้องยังมีความสัมพันธ์แบบสมการเส้นตรงเชิงลบกับปริมาณสาร โพลีฟีนอลอีกด้วย โดยมีสมการความสัมพันธ์คือ $y = -0.40x + 53.44$ (R^2 เท่ากับ 0.80) $y = -0.24x + 11.58$ (R^2 เท่ากับ 0.72) และ $y = -0.40 + 15.95$ (R^2 เท่ากับ 0.85) ตามลำดับ (ดังรูปที่ 17, 18 และ 19) กล่าวคือ เมล็ดข้าวกล้องที่มีค่าความสว่างน้อย และมีค่าสีแดงและสีม่วงเพิ่มขึ้น จะพบปริมาณสาร โพลีฟีนอลมากขึ้น



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่าง L* และปริมาณโพลีฟีนอลของข้าวกล้องมีสี

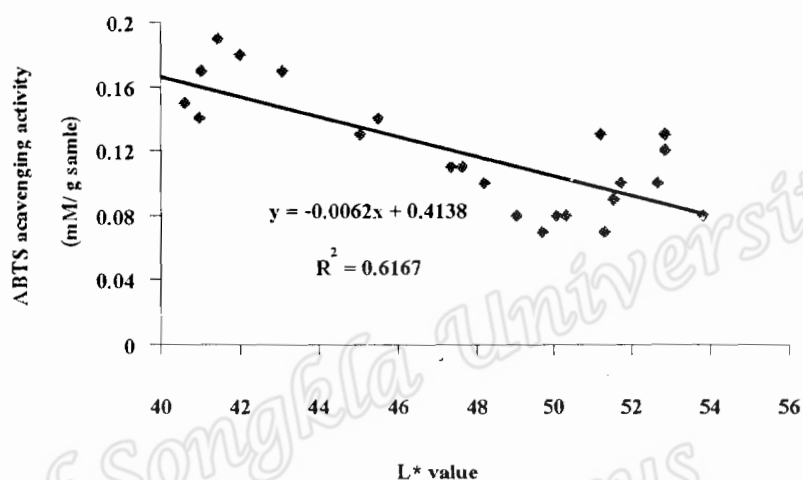


รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่าง a* และปริมาณโพลีฟีนอลของข้าวกล้องมีสี



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่าง b* และปริมาณโพลีฟีนอลของข้าวกล้องมีสี

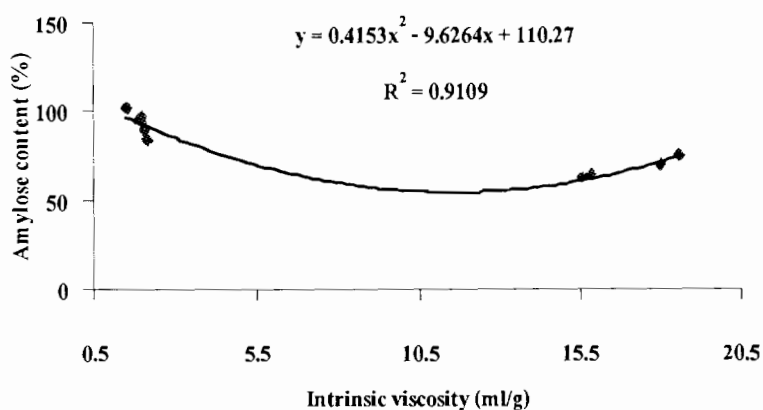
นอกจากนี้ค่า L^* ของเมล็ดข้าวกล้องยังมีความสัมพันธ์แบบสมการเส้นตรงเชิงลบกับความสามารถในการกำจัดอนุมูล ABTS อีกด้วย โดยมีสมการความสัมพันธ์คือ $y = -0.00x + 0.41$ (R^2 เท่ากับ 0.61) ดังรูปที่ 20 กล่าวคือ เมล็ดข้าวกล้องที่มีความเข้มของสีมาก จะมีความสามารถกำจัดอนุมูลอิสระสูง เนื่องจากมีปริมาณของสาร โพลีฟีนอลสูง เช่น ข้าวกล้อง BWR-96044, BWR-96025 และ CMP



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการกำจัดอนุมูล ABTS และค่า L^*

4.6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะไมโลสและความหนืดอินทรีนสิก

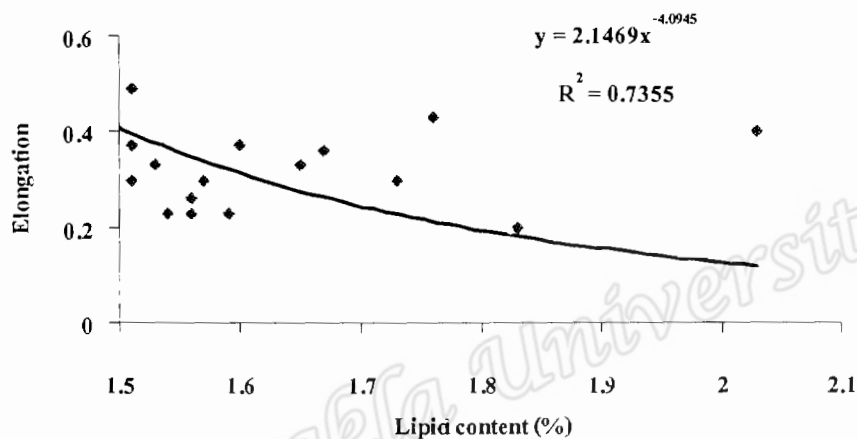
สำหรับปริมาณอะไมโลสและความหนืดอินทรีนสิกที่วิเคราะห์ได้จากสสารข้าวพื้นเมืองที่มีความสัมพันธ์แบบสมการโพลิโนเมียล (Polynomials) มีสมการคือ $y = 0.41x^2 - 9.62x + 110.27$ (R^2 เท่ากับ 0.91) ดังรูปที่ 21



รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะไมโลส และความหนืดอินทรีนสิก

4.6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไขมันและอัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าว

อัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวมีความสัมพันธ์แบบสมการเชิงเส้นกำลังสองในเชิงลบกับปริมาณไขมัน (ดังรูปที่ 22) โดยมีสมการความสัมพันธ์คือ $y = 2.14x^{-4.09}$ (R^2 เท่ากับ 0.73) กล่าวคือ ปริมาณไขมันที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้อัตราการยืดตัวของเมล็ดลดลง



รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างการยืดตัวของเมล็ด และปริมาณไขมัน