

ผลการศึกษารูปร่างเม็ดสตาร์ชด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า มีรูปร่างหลายเหลี่ยม (Polyhedric morphology) และคล้ายกันทั้ง 8 ชนิด (รูปที่ 11) เม็ดสตาร์ชที่ได้จากธัญพืชส่วนมากจะมีลักษณะรูปร่างเช่นเดียวกัน เม็ดสตาร์ชมีการกระจายตัวที่ดีและไม่มีการเกาะกลุ่ม ผลการทดลองคล้ายคลึงกับการศึกษาของ Sodhi and Singh (2003) ที่ได้ศึกษารูปร่างและขนาดของสตาร์ชข้าวจากอินเดียจำนวน 5 พันธุ์คือ PR-106, PR-114, PR-103, IR-8 และ PR-113 ด้วยเครื่อง SEM ผลการทดลองพบว่าเม็ดสตาร์ชส่วนมากมีรูปร่างแบบหลายเหลี่ยม นอกจากนี้รูปร่างเม็ดสตาร์ชข้าวในประเทศไทยก็มีรายงานว่า มีรูปร่างหลายเหลี่ยมเช่นเดียวกัน (รุ่งนภา และคณะ, 2546; สุพิศา, 2547)

Prince of Songkla University  
Pattani Campus

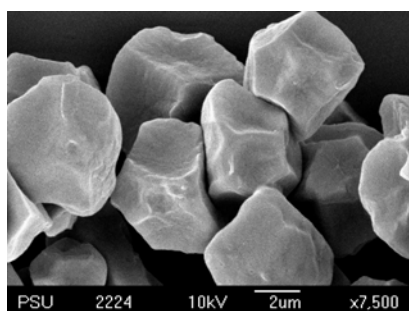
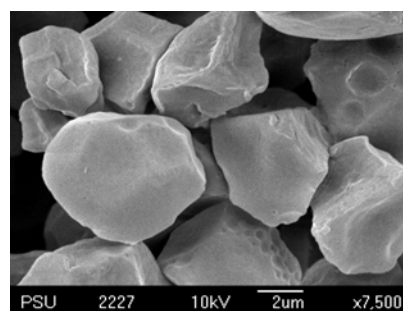
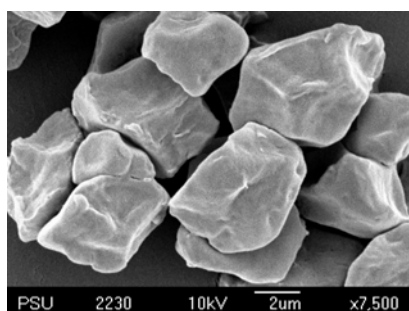
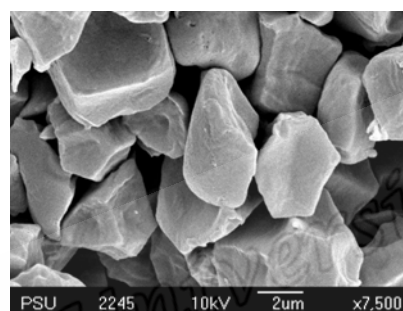
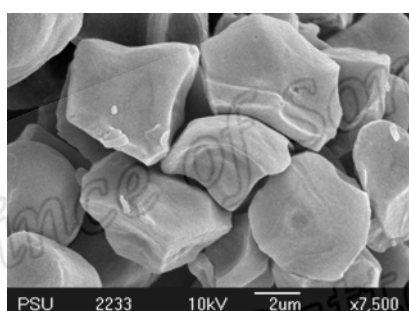
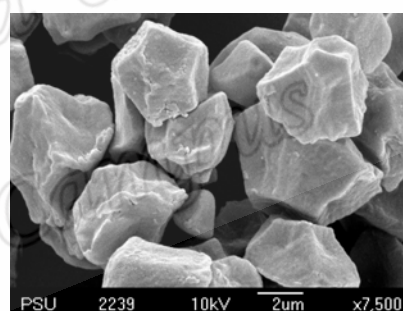
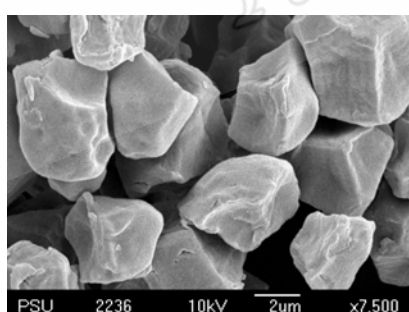
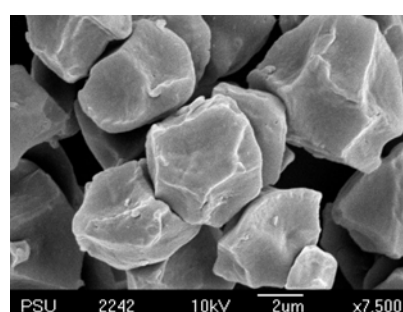
**HK****KN****SY****CMP****BWR-96060****BWR-96044****BWR-96025****KR**

Fig 11 SEM micrograph of pigmented rice starch granule (x7500)

#### 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)

Table 31 Granule size and size distribution of pigmented rice starches

Rice varieties	Granule size distribution			
	0-10 $\mu\text{m}$ (%)	10-100 $\mu\text{m}$ (%)	Mean ( $\mu\text{m}$ )	
Non-waxy Rice	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
Waxy Rice	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

Mean value  $\pm$  standard deviation of triplicates.

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

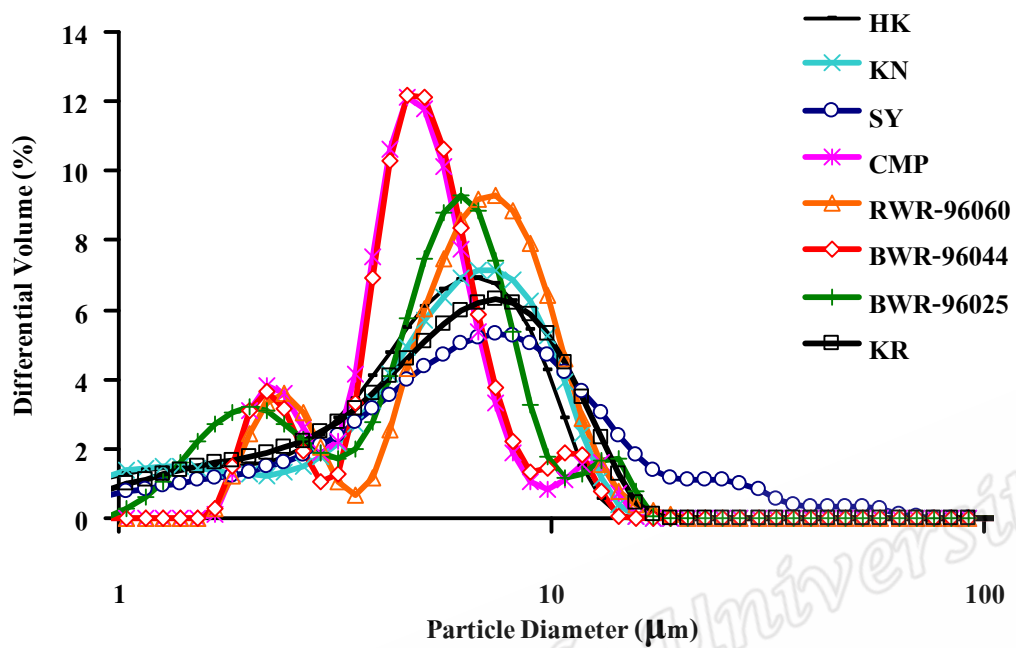


Fig 12 Granule size distribution of pigmented rice starches

#### 4.3.1.3 รูปแบบโครงสร้างผลึก

ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวที่ใช้ในการทดลองด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer) พบว่าสตาร์ชข้าวมีสีทุกพันธุ์ที่ใช้ในการทดลองมีโครงสร้างผลึกแบบ A โดยจะปรากฏพิกัดหลักที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 15 องศาจำนวน 1 พิกัด ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 17-18 องศา จำนวน 2 พิกัดที่เชื่อมต่อกัน และตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 23 องศา จำนวน 1 พิกัด ซึ่งลักษณะรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ A จะพบมากในสตาร์ชข้าว (Bluleon *et al.*, 1998; Jaroen *et al.*, 1995; Ratnayake and Jackson, 2007) ดังรูปที่ 13

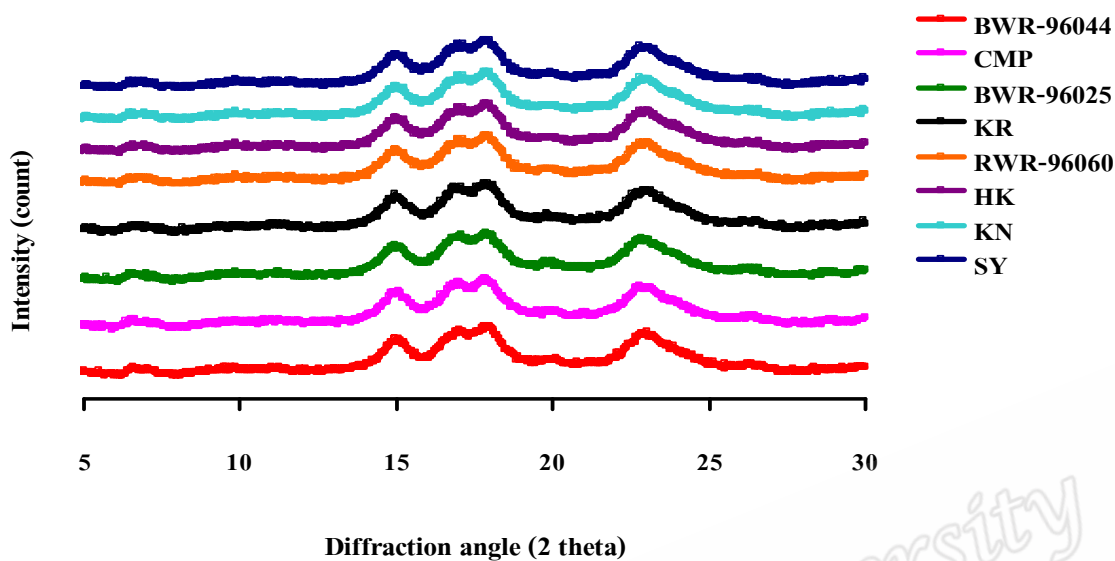


Fig 13 X-ray diffractogram of pigmented rice starches

#### 4.3.1.4 ความหนืดอินทรีนลิก

ความหนืดอินทรีนลิกเป็นสมบัติทางโมเลกุลอย่างหนึ่ง ได้จากการวัดความหนืดของสตาร์ชผ่านหลอดกะปิลาร์รี่ในสภาวะที่เฉื่อย เป็นสมบัติที่บ่งบอกถึง Hydrodynamic volume ผลการทดลองพบว่า สตาร์ชข้าวเจ้ามีความหนืดอินทรีนลิกในช่วง 63.53-75.13 มิลลิลิตรต่อกรัม ส่วนสตาร์ชข้าวเหนียวมีความหนืดอินทรีนลิกในช่วง 83.86-101.83 มิลลิลิตรต่อกรัม จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าสตาร์ชข้าวทั้ง 8 ชนิดมีความหนืดอินทรีนลิกที่แตกต่างกัน สตาร์ชข้าวเจ้ามีค่าความหนืดอินทรีนลิกต่ำกว่าสตาร์ชข้าวเหนียว โดยมีผลสอดคล้องกับกำลังการพองตัว พบว่าปริมาณอะไมโลสมีความสัมพันธ์เชิงลบกับความหนืดอินทรีนลิก ( $r = -0.877$ ) ดังตารางภาคผนวกที่ 7

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

Table 32 Intrinsic viscosity of Southern Thailand pigmented rice

	Rice varieties	Intrinsic viscosity (ml/g)
Non-waxy Rice	HK	63.53±0.61 <sup>a</sup>
	KN	69.86±0.23 <sup>b</sup>
	SY	75.13±0.92 <sup>c</sup>
Waxy Rice	RWR 96060	89.60±0.43 <sup>c</sup>
	BWR 96025	96.76±0.28 <sup>g</sup>
	CMP	83.86±0.41 <sup>d</sup>
	KR	101.83±0.40 <sup>h</sup>
	BWR 96044	94.16±0.57 <sup>f</sup>

Mean value ± standard deviation of triplicates.

Mean value with different letter are significantly different ( $p < 0.05$ )

#### 4.3.2 สมบัติทางเคมี

ผลการศึกษารองศ์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชข้าว แสดงดังตารางที่ 33 ปริมาณความชื้นของสตาร์ชข้าวทุกพันธุ์อยู่ในช่วง 6.70-8.89 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าความชื้นของสตาร์ชข้าว KN CMP และ KR มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับปริมาณโปรตีนพบว่าสตาร์ชข้าวทุกพันธุ์มีโปรตีนไม่แตกต่างกันโดยอยู่ในช่วง 0.67-0.69 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ปริมาณไขมันอยู่ในช่วง 0.02-0.19 เปอร์เซ็นต์ และไม่แตกต่างกันทางสถิติ โยอาหารของสตาร์ชข้าวทั้ง 8 พันธุ์มีน้อยมากไม่สามารถตรวจวัดได้ด้วยวิธีการของ AOAC สำหรับปริมาณเถ้าของสตาร์ชข้าวทุกชนิด (ยกเว้นพันธุ์ BWR-96044) ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยอยู่ในช่วง 0.26-0.49 เปอร์เซ็นต์ องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชข้าวทุกพันธุ์ มีค่าต่ำกว่าข้าวกล้องและข้าวขัดขาว เนื่องจากสตาร์ชข้าวได้กำจัดเอาเยื่อหุ้มเมล็ดที่อุดมไปด้วยโปรตีน ไขมัน โยอาหารและเถ้า (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 ปริมาณอะไมโลสที่ศึกษารองศ์ครั้งนี้มีค่าสูงกว่าปริมาณอะไมโลสที่พบในข้าวเหนียว แต่มีความคล้ายคลึงกับ

การศึกษาของ สุพิศา (2547) ที่พบว่าข้าวเหนียวในกลุ่มของข้าวมีสีในประเทศไทยมีปริมาณอะไมโลสค่อนข้างสูงโดยอยู่ในช่วง 3-7 เปอร์เซ็นต์ (จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการทำปฏิกิริยากับไอโอดีน) สาเหตุที่ปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชข้าวเหนียวที่วิเคราะห์ได้จากการศึกษานี้มีค่าสูงกว่าปริมาณอะไมโลสที่พบในสตาร์ชข้าวเหนียวทั่วไปที่พบในประเทศไทย (ซึ่งมีปริมาณอะไมโลสอยู่ในช่วง 0-3 เปอร์เซ็นต์) ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากวิธีการวิเคราะห์ การศึกษานี้ใช้วิธีการทำปฏิกิริยากับไอโอดีน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วทั้งอะไมโลสและอะไมโลเพกตินสามารถพัฒนาสีได้กับไอโอดีน โดยอะไมโลเพกตินจะให้สีแดง (อรอนงค์, 2545) จึงอาจมีผลให้ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสตาร์ชมีค่าสูงเกินความจริงและส่งผลกระทบต่อค่าปริมาณอะไมโลสสูงกว่าปกติด้วย การวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสอาจใช้วิธีการอื่นเช่น วิธีการตกตะกอนอะไมโลเพกตินด้วย Concanavalin A ก่อนการวิเคราะห์หรืออาจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโครมาโตกราฟีที่ช่วยลดการแปรปรวนในการทดลองได้ อะไมโลสเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของสตาร์ชและคุณภาพการหุงต้มและการรับประทานของข้าวซึ่งจะอภิปรายต่อไป

Prince of Songkla University  
Pattani Campus



Table 33 Chemical compositions of starches

Rice varieties		Amylose content (% db.)	Moisture (% wb.)	Lipid (% db.)	Protein (% db.)	Carbohydrate (% db.)	Crude fiber (% db.)	Ash (% db.)
Non waxy rice	HK	28.19±0.27 <sup>g</sup>	8.17±0.12 <sup>cd</sup>	0.02±0.05 <sup>a</sup>	0.68±0.00 <sup>a</sup>	90.84±0.13 <sup>b</sup>	Tr	0.26±0.05 <sup>a</sup>
	KN	25.30±1.27 <sup>f</sup>	6.70±0.17 <sup>a</sup>	0.13±0.04 <sup>ab</sup>	0.69±0.00 <sup>a</sup>	92.16±0.10 <sup>d</sup>	Tr	0.30±0.17 <sup>a</sup>
	SY	18.30±0.12 <sup>e</sup>	8.89±0.72 <sup>d</sup>	0.15±0.05 <sup>ab</sup>	0.67±0.00 <sup>a</sup>	90.00±0.68 <sup>a</sup>	Tr	0.26±0.05 <sup>a</sup>
Waxy rice	RWR-96060	8.57±0.26 <sup>cd</sup>	7.84±0.20 <sup>bc</sup>	0.18±0.08 <sup>b</sup>	0.68±0.00 <sup>a</sup>	90.85±0.29 <sup>b</sup>	Tr	0.43±0.06 <sup>a</sup>
	BWR-96025	7.31±0.26 <sup>b</sup>	7.17±0.36 <sup>ab</sup>	0.12±0.05 <sup>ab</sup>	0.69±0.03 <sup>a</sup>	91.71±0.44 <sup>cd</sup>	Tr	0.28±0.09 <sup>a</sup>
	CMP	8.74±0.47 <sup>d</sup>	6.73±0.23 <sup>a</sup>	0.03±0.05 <sup>a</sup>	0.69±0.00 <sup>a</sup>	92.17±0.24 <sup>d</sup>	Tr	0.36±0.05 <sup>a</sup>
	KR	7.25±0.27 <sup>a</sup>	6.82±0.65 <sup>a</sup>	0.19±0.00 <sup>b</sup>	0.68±0.00 <sup>a</sup>	91.92±0.58 <sup>cd</sup>	Tr	0.36±0.05 <sup>a</sup>
	BWR-96044	8.00±0.28 <sup>bc</sup>	7.48±0.39 <sup>abc</sup>	0.09±0.15 <sup>ab</sup>	0.68±0.00 <sup>a</sup>	91.24±0.25 <sup>bc</sup>	Tr	0.49±0.01 <sup>b</sup>

Mean value ± standard deviation of triplicates

Mean value with different letter in the same column are significantly different ( $p < 0.05$ )

Tr mean trace



### 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

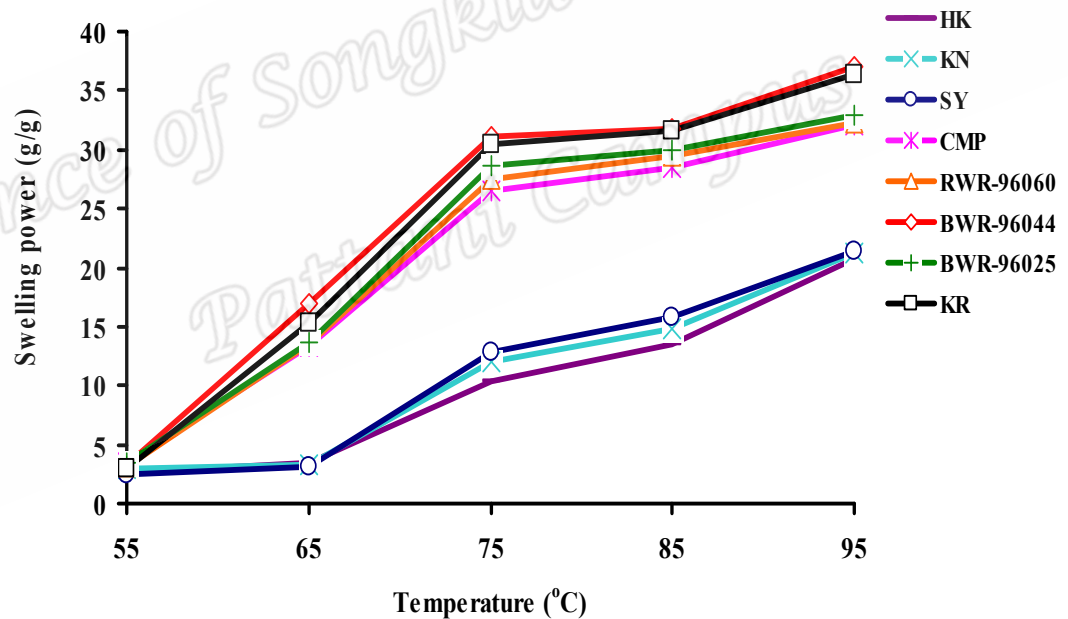


Fig 14 Swelling power at different temperatures of pigmented rice starches

ปัจจัยที่อาจมีผลต่อกำลังการพองตัวของสตาร์ชได้แก่ ไขมัน และขนาดของเม็ดสตาร์ชซึ่งจากการทดลองนี้พบว่าสตาร์ชข้าวพันธุ์ KR และ BWR-96025 มีกำลังในการพองตัวสูงกว่าสตาร์ชข้าวพันธุ์ BWR-96044 ทั้งๆที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสตาร์ชข้าวพันธุ์ KR และ BWR-96025 มีปริมาณไขมันสูงกว่า ในระหว่างการให้ความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างไขมันและอะไมโลสกลายเป็นอะไมโลสไลปิดคอมเพล็กซ์ สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นนี้มีโครงสร้างโมเลกุลที่แข็งแรง ต้องใช้พลังงานความร้อนในการทำละลายสูง 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 การให้ความร้อนแก่สตาร์ชในสภาวะที่มีน้ำเพียงพอ ความร้อนมีผลทำให้พันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย และโมเลกุลของน้ำสามารถเข้าไปจับกับหมู่ไฮดรอกซิลภายในเม็ดสตาร์ช เม็ดสตาร์ชจึงเกิดการพองตัวจนเกิดการแตกตัวของเม็ดสตาร์ช ทำให้โมเลกุลในเม็ดสตาร์ชโดยเฉพาะอะไมโลสหลุดออกจากเม็ดสตาร์ชและเกิดการละลาย ทำให้ค่าการละลายเพิ่มขึ้น (Nimsung *et al.*, 2005) จากการทดลองสังเกตพบว่าสตาร์ชข้าวเหนียวมีความสามารถในการละลายต่ำกว่าสตาร์ชข้าวเจ้า เพราะสตาร์ชข้าวเหนียวมีส่วนของอะไมโอเพคตินต่ออะไมโลสสูงกว่าสตาร์ชข้าวเจ้า ซึ่งโครงสร้างของอะไมโอเพคตินเป็นโครงสร้างที่มีกิ่งก้านสาขามาก เมื่อเม็ดสตาร์ชแตกตัวทำให้โครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ถูกขังอยู่ภายในเม็ดสตาร์ช ทำให้เกิดการละลายได้น้อย

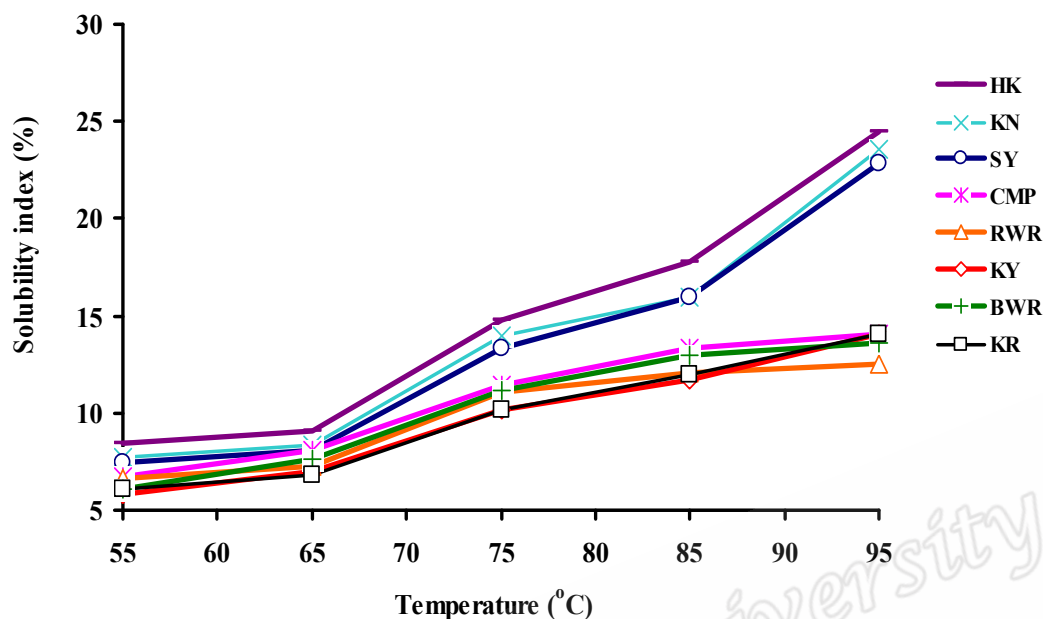


Fig 15 Solubility of various pigmented rice starches

#### 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

มีค่าสูงที่สุดในกลุ่มสตาร์ชข้าวเหนียว จากการทดลองพบว่าสตาร์ชข้าวเหนียวมี Peak viscosity สูงกว่าสตาร์ชข้าวเจ้า และมีความสอดคล้องกับกำลังการพอง เพราะสตาร์ชข้าวเหนียวมีปริมาณอะไมโลเพกตินสูงกว่าสตาร์ชข้าวเจ้า ซึ่งโครงสร้างของอะไมโลเพกตินมีกิ่งก้านสาขามาก ทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวได้ดีกว่า นอกจากนี้อะไมโลสในสตาร์ชอาจรวมตัวกับไขมันเป็นอะไมโลสไลปิด คอมเพล็กซ์ส่งผลให้ความหนืดของสตาร์ชต่ำ สังกัดได้จากสตาร์ช SY ที่มีค่า Peak viscosity ต่ำสุดในกลุ่มข้าวเจ้า ทั่วๆไปควรจะมีความหนืดสูงที่สุด เพราะมีอะไมโลสต่ำ แต่เนื่องจากมีปริมาณไขมันสูงจึงอาจทำให้มี Peak viscosity ต่ำ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าสตาร์ชข้าว HK และ SY มีค่าดังกล่าวไม่ต่างกัน

สำหรับ Trough viscosity ซึ่งเป็นความหนืดต่ำสุดหลังจากลดอุณหภูมิพร้อมกับให้แรงเฉือน พบว่าสตาร์ชข้าวเจ้ามีค่า Trough viscosity ต่ำกว่าสตาร์ชข้าวเหนียว (783.66-901.66 และ 1037.66-1318.66 เซนติพอยด์ ตามลำดับ) สตาร์ชข้าว SY มีค่า Trough viscosity น้อยที่สุดในขณะที่สตาร์ช BWR-96044 มีค่า Trough viscosity สูงที่สุด การที่สตาร์ชข้าวเหนียวมีค่า Trough viscosity สูงกว่าสตาร์ชข้าวเจ้า เนื่องจากสตาร์ชข้าวเหนียวมีอะไมโลเพกตินสูงกว่าสตาร์ชข้าวเหนียว ส่งผลให้สตาร์ชข้าวเหนียวมีความสามารถในการจับกับน้ำได้ดีกว่าสตาร์ชข้าวเจ้า ความต่างระหว่างความหนืดสูงสุดกับความหนืดต่ำสุด สามารถบอกถึงความทนต่อแรงกวน (Breakdown viscosity) ซึ่งอยู่ในช่วง 631.66-1382.33 เซนติพอยด์ สตาร์ชข้าวเจ้ามีความทนต่อแรงกวนมากกว่าสตาร์ชข้าวเหนียว ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าสตาร์ช HK และ KN มีความทนต่อแรงกวนสูงและไม่แตกต่างกัน ( $p < 0.05$ ) การเปลี่ยนแปลงของ Breakdown viscosity ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสตาร์ช เพราะสตาร์ชที่มีอะไมโลสสูง จะมีความแข็งแรง ทนทานต่อแรงกวนได้ดี จึงทำให้ค่า Breakdown viscosity ต่ำ (Jane and Chen, 1993)

เมื่อลดอุณหภูมิจาก 95 องศาเซลเซียสไปเป็น 50 องศาเซลเซียส สตาร์ชจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นเรียกว่า Final viscosity จากการศึกษานี้พบว่า Final viscosity ของข้าวทุกพันธุ์มีความแตกต่างทางสถิติ โดยสตาร์ชข้าวเจ้ามีค่า Final viscosity อยู่ในช่วง 1395.33-1858.33 เซนติพอยด์ และสตาร์ชข้าวเหนียวมีค่า Final viscosity ต่ำกว่าสตาร์ชข้าวเจ้าคืออยู่ในช่วง 1223.66-1592.66 เซนติพอยด์ สตาร์ชในกลุ่มข้าวเจ้าพบว่า HK มีค่า Final viscosity สูงที่สุด ส่วนสตาร์ช BWR-96044 มีค่า Final viscosity สูงที่สุดในกลุ่มข้าวเหนียว ความแตกต่างระหว่างค่า Final viscosity กับ Trough viscosity จะบอกถึงความคงตัวของสตาร์ชเรียกว่า Setback viscosity พบว่าสตาร์ชข้าวเจ้ามีค่า Setback viscosity สูงกว่าสตาร์ชข้าวเหนียว ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าสตาร์ชข้าว 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 ก็คือเมื่อลดอุณหภูมิของอะไมโลสที่ถูกปลดปล่อยจะเกิดการรวมตัวกันเรียกว่าการเกิดรีโทรกราเดชัน 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 ใยอาหารและเถ้า มีผลทำให้แป้งข้าวมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดต่างจากสตาร์ช จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าไขมัน ใยอาหารและเถ้า 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 ต่ำกว่ากว่าแป้งข้าวขัดขาวและสตาร์ช เนื่องจากโปรตีนมีส่วนในการขัดขวางการพองตัวทำให้ความหนืดลดลง นอกจากนี้ไขมันอาจรวมตัวกับอะไมโลสเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่แข็งแรงทำให้ใช้เวลาในการเกิดเจลที่ในเซชันเพิ่มขึ้นและความหนืดของเจลลดลงด้วย ส่วนแป้งข้าวขัดมีค่า Final viscosity และ Setback viscosity สูงกว่าแป้งข้าวกล้องและสตาร์ช เพราะแป้งข้าวขัดขาวมีใยอาหารน้อยแต่มีโปรตีนและไขมันที่หลงเหลือจากการขัดสี องค์ประกอบเหล่านี้มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับการเกิดรีโทรกราเดชัน

Table 34 Pasting properties of pigmented rice starch

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

Mean value ± standard deviation of triplicates.

Mean value with different letter in the same column are significantly different ( $p < 0.05$ )

Table 35 Pasting properties of pigmented brown rice flour

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

Mean value ± standard deviation of triplicates.

Mean value with different letter in the same column are significantly different ( $p < 0.05$ )



Table 36 Pasting properties of pigmented milled rice flour

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

Mean value ± standard deviation of triplicates.

Mean value with different letter in the same column are significantly different ( $p < 0.05$ )

#### 4.3.3.4 การเกิดเจลาทีโนเซชัน

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

ปัจจัยที่อาจส่งผลให้สตาร์ชข้าวมีอุณหภูมิการเกิดเจลาทีโนเซชันต่างกัน คือ ปริมาณ อะไมโลส ความเป็นผลึกของสตาร์ช และปริมาณไขมัน จากการศึกษาของ Hoover and Manuel (1996) พบว่าความเป็นผลึกของสตาร์ชจะอยู่ในส่วนของสายโซ่สายสั้นของอะไมโลเพคติน ดังนั้นสตาร์ชที่มีสัดส่วนของอะไมโลเพคตินสูง อย่างเช่นสตาร์ชข้าวเหนียวมีค่าความเป็นผลึกสูงกว่าสตาร์ชข้าวเจ้า จึงทำให้  $\Delta H$  ที่ใช้ในการเกิดเจลาทีโนเซชันมากกว่า เนื่องจากต้องการพลังงานความร้อนสูงเพื่อทำลายส่วนที่เป็นผลึกเหล่านั้น และจากการศึกษาของ Noosuk *et al.* (2005) และ Jacquier *et al.* (2006) พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลาทีโนเซชันของสตาร์ชจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอะไมโลสสูงขึ้นเพราะอะไมโลสเป็น โครงสร้างสามารถเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับไขมันได้ ทำให้เกิดโมเลกุลแบบเกลียวม้วนซึ่งต้องใช้พลังงานสูงในการทำลายพันธะในการเกิดเจลาทีโนเซชัน นอกจากนี้ปริมาณไขมันก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้  $\Delta H$  สูง สังเกตได้จากสตาร์ชข้าว SY และ KN ที่มีค่า  $\Delta H$  สูงกว่าสตาร์ชข้าว HK ทั้งที่ความจริงแล้วเป็นข้าวเจ้าเหมือนกัน เพราะว่สตาร์ชข้าว SY และ KN มีปริมาณ ไขมันสูง ส่งผลให้เกิดอะไมโลสไลปิดคอมเพล็กซ์ ทำให้ต้องใช้  $\Delta H$  สูง

Table 37 Gelatinization temperature and enthalpy of pigmented rice starches

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

Mean value ± standard deviation of triplicates.

Mean value with different letter in the same column are significantly different ( $p < 0.05$ )

#### 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<sub>o</sub> และ T<sub>p</sub> ไม่แตกต่างกัน ขณะที่ T<sub>c</sub> ของสตาร์ชข้าวเหนียวต่ำกว่าสตาร์ชข้าวเจ้า ส่งผลให้ค่า T<sub>o</sub>-T<sub>c</sub> 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

และอาจทำปฏิกิริยากับอะไมโลสกลายเป็นอะไมโลสไลปิดคอมเพล็กซ์ที่มีโครงสร้างที่แข็งแรง  
ต้องใช้อุณหภูมิและพลังงานความร้อนสูงในการทำลาย

Table 38 Retrogradation temperature and enthalpy of pigmented rice starches

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

Mean value ± standard deviation of triplicates.

Mean value with different letter in the same column are significantly different ( $p < 0.05$ )

สำหรับการขับน้ำออกจากเจลของสตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชข้าวเหนียวอยู่ในช่วง 36.67-49.76 และ 27.43-28.39 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติในกลุ่มข้าวเจ้า พบว่า สตาร์ชข้าว HK มีการขับน้ำออกจากเจลแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับสตาร์ชข้าว SY และ KN ส่วน สตาร์ชข้าวเหนียวไม่มีความแตกต่างกัน ผลการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของเจลด้วยเครื่องวิเคราะห์ เนื้อสัมผัส พบว่าความแข็งของเจลของสตาร์ชข้าวเจ้าและข้าวเหนียวอยู่ในช่วง 0.594-0.888 และ 0.064-0.149 กิโลกรัมตามลำดับ และมีค่าความคงตัวของเจลอยู่ในช่วง 3.059-4.874 และ 0.349-0.636 กิโลกรัมต่อวินาที ตามลำดับ และพบว่าค่าความแข็งแรงและค่าความคงตัวของเจลจากสตาร์ช ข้าวทุกพันธุ์แตกต่างกัน

การขับน้ำออกจากเจล ค่าความแข็งแรงของเจล และค่าความคงตัวของเจล เป็น ค่าที่มีความสัมพันธ์กับการระดับเกิดรีโทกราเดชันของสตาร์ช และมีความสัมพันธ์กับอะไมโลส กล่าวคือ หลังจากการเกิดเจลที่ในเซชัน โมเลกุลอะไมโลสที่ถูกปลดปล่อยจากเม็ดสตาร์ชจะเกิดการเรียงตัวกันใหม่ (รีโทกราเดชัน) เกิดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงขึ้นอีกครั้ง สตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะมีความแข็งแรงของเจล และมีค่าความคงตัวของเจลสูงด้วย ในการเกิดการรวมตัวกัน

ใหม่ของโมเลกุลของอะไมโลส หลังการเกิดเจลาทิไนเซชันนี้จะมีการจับน้ำออกมา 1 โมเลกุล เพื่อให้สายโมเลกุลของอะไมโลสได้ทำพันธะไฮโดรเจนด้วยกัน ซึ่งหากสตาร์ชมีปริมาณอะไมโลสสูง การจับน้ำจะสูงไปด้วย ทำให้สตาร์ชข้าวเจ้ามีการจับน้ำสูงกว่าสตาร์ชข้าวเหนียว (Perera and Hoover, 1999; Sodhi and Singh, 2003)

Table 39 Degree of retrogradation, syneresis and gel consistency of native pigmented rice starches

Rice varieties		Degree of retrogradation (%)	Syneresis* (%)	Gel texture**	
				Hardness (kg)	Cohesiveness (kg.s)
Non waxy rice	HK	56.26	49.76±0.46 <sup>c</sup>	0.888±0.006 <sup>g</sup>	4.874±0.011 <sup>h</sup>
	KN	41.60	37.43±1.00 <sup>b</sup>	0.783±0.008 <sup>f</sup>	3.880±0.022 <sup>g</sup>
	SY	35.94	36.67±0.88 <sup>b</sup>	0.594±0.004 <sup>e</sup>	3.059±0.012 <sup>f</sup>
Waxy rice	RWR 96060	22.59	28.06±1.60 <sup>a</sup>	0.104±0.000 <sup>c</sup>	0.485±0.006 <sup>d</sup>
	BWR 96025	25.43	27.52±0.22 <sup>a</sup>	0.070±0.002 <sup>a</sup>	0.382±0.011 <sup>b</sup>
	CMP	25.08	28.39±0.26 <sup>a</sup>	0.149±0.006 <sup>d</sup>	0.636±0.007 <sup>c</sup>
	KR	26.13	27.43±0.11 <sup>a</sup>	0.064±0.005 <sup>a</sup>	0.349±0.002 <sup>a</sup>
	BWR 96044	21.52	27.84±0.13 <sup>a</sup>	0.089±0.001 <sup>b</sup>	0.442±0.001 <sup>c</sup>

\*Mean value ± standard deviation of triplicates.

\*\* Mean value ± standard deviation of five replicates.

Mean value with different letter in the same column are significantly different ( $p < 0.05$ )

#### 4.4 การศึกษาคุณภาพในการหุงต้ม

การศึกษาคูณภาพการหุงต้มของข้าวกล้องและข้าวขัดขาวประกอบด้วย การยืดตัว และการขยายปริมาตรของเมล็ดข้าว มีการเตรียมตัวอย่างข้าวเพื่อวัดคุณภาพดังกล่าว คือตัวอย่างข้าวเจ้าเตรียมโดยการหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า ในขณะที่ข้าวเหนียวจะมีการเตรียมโดยการนึ่งด้วยไอน้ำ ผลการศึกษามีดังต่อไปนี้

##### 4.4.1 การยืดตัวของเมล็ดข้าว

ผลศึกษาอัตราการยืดตัวของข้าวกล้องพบว่าข้าวเจ้ากล้องมีอัตราการยืดตัวในช่วง 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

ในขณะที่หุงต้มอะไมโลสในสตาρχ้าวอาจทำปฏิกิริยากับไขมัน เป็นอะไมโลสไลปิดคอมเพล็กซ์ ทำให้การเกิดเจลลาทีนในเซชันไม่สมบูรณ์ เมล็ดข้าวดูดซึมน้ำได้น้อยลง จึงมีการยืดตัวต่ำซึ่งสังเกตได้จากข้าวกล้องพันธุ์ BWR-96044 และข้าวที่มีปริมาณโปรตีนสูงจะมีอัตราการยืดตัวต่ำด้วย เพราะโปรตีนในเมล็ดข้าวอาจเกิดการแข่งขันกับสตาρχในการดูดซึมน้ำขณะหุงต้ม ซึ่งเป็นการขัดขวางการเกิดเจลลาทีนในเซชัน (สุพิศา, 2547) การขัดสีทำให้เมล็ดข้าวมีปริมาณไขมันและโปรตีนลดลง ข้าวขัดขาวจึงมีการยืดตัวมากกว่าข้าวกล้อง

Table 40 Elongation of pigmented rice grain

Rice varieties		Elongation	
		Brown rice	Milled rice
Non waxy rice	HK	1.02±0.05 <sup>a</sup>	1.57±0.19 <sup>b</sup>
	KN	1.00±0.07 <sup>a</sup>	1.44±0.06 <sup>a</sup>
	SY	1.04±0.04 <sup>ab</sup>	1.51±0.10 <sup>ab</sup>
Waxy rice	RWR 96060	1.08±0.05 <sup>b</sup>	1.40±0.05 <sup>a</sup>
	BWR 96025	1.14±0.07 <sup>c</sup>	1.42±0.06 <sup>a</sup>
	CMP	1.08±0.04 <sup>b</sup>	1.62±0.08 <sup>b</sup>
	KR	1.14±0.03 <sup>c</sup>	1.59±0.20 <sup>b</sup>
	BWR 96044	1.09±0.04 <sup>b</sup>	1.59±0.05 <sup>b</sup>

Mean value ± standard deviation of ten replicates.

Mean value with different letter in the same column are significantly different ( $p < 0.05$ )

#### 4.4.2 การขยายปริมาตรหลังการหุง

การขยายปริมาตรหลังการหุงของกลุ่มข้าวเจ้ากล้องอยู่ในช่วง 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 นอกจากนี้ กลุ่มข้าวเหนียวขัดขาวมีการขยายปริมาตรที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติโดยอยู่ในช่วง 1.08-1.10 แต่มีค่าต่ำกว่ากลุ่มของข้าวเจ้าอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสตาร์ชข้าวเหนียวมีองค์ประกอบของสายอะไมโลเพกตินที่มีสายยาวมากกว่าสตาร์ชข้าวเจ้า ซึ่งอาจไปเกาะเกี่ยวกับโครงสร้างอะไมโลสเกิดเป็นกลุ่มคลัสเตอร์ ซึ่งมีโครงสร้างเป็นเกลียวคู่ภายในโครงสร้างนี้มีความแข็งแรงมาก ข้าวเหนียวจึงมีการขยายปริมาตรหลังการหุงน้อยกว่าข้าวเจ้า (Singh *et al.*, 2003)

จากการทดลองพบว่าข้าวขัดขาวมีการขยายปริมาตรมากกว่าข้าวกล้อง เพราะข้าวกล้องมีปริมาณไขมัน โปรตีน และใยอาหารสูงกว่า ซึ่งในขณะที่หุงต้มเยื่อหุ้มเมล็ดในข้าวกล้องจะเป็นตัวขัดขวางไม่ให้น้ำเข้าไปภายในเมล็ดได้ เมล็ดข้าวกล้องจึงเกิดเจลลาทีนเซชันได้ยากและเกิดได้ไม่สมบูรณ์ สตาร์ชภายในเมล็ดพองตัวไม่เต็มที่ จึงส่งผลให้มีการขยายปริมาตรน้อย นอกจากนี้



ไขมันและโปรตีนที่เชื่อมเมล็ดของข้าวกล้องมีผลต่อการขยายปริมาตรเช่นกัน เพราะไขมันอาจทำปฏิกิริยากับอะไมโลสในขณะที่มีการหุงต้ม และโปรตีนในเมล็ดข้าวอาจเกิดการแข่งขันกับสตาร์ชในการดูดซับน้ำขณะหุงต้ม เมล็ดข้าวจึงมีการขยายปริมาตรต่ำ การขัดสีช่วยให้ข้าวมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากไปลดปริมาณไขมัน โปรตีน ใยอาหารและเถ้าในเมล็ดข้าว

Table 41 Expansion value of pigmented rice

Rice varieties		Expansion value	
		Brown rice	Milled rice
Non waxy rice	HK	1.80±0.05 <sup>c</sup>	1.91±0.00 <sup>b</sup>
	KN	1.76±0.02 <sup>c</sup>	1.88±0.03 <sup>b</sup>
	SY	1.80±0.05 <sup>c</sup>	1.86±0.16 <sup>b</sup>
Waxy rice	RWR 96060	0.99±0.09 <sup>a</sup>	1.08±0.04 <sup>a</sup>
	BWR 96025	1.07±0.02 <sup>ab</sup>	1.10±0.02 <sup>a</sup>
	CMP	1.07±0.03 <sup>ab</sup>	1.08±0.03 <sup>a</sup>
	KR	1.08±0.02 <sup>b</sup>	1.10±0.01 <sup>a</sup>
	BWR 96044	1.09±0.04 <sup>b</sup>	1.17±0.13 <sup>a</sup>

Mean value ± standard deviation of triplicates.

Mean value with different letter in the same column are significantly different ( $p < 0.05$ )

#### 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 อาจไปเกาะเกี่ยวกับไขมันได้ เช่นเดียวกับอะไมโลส 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 ใยอาหาร โปรตีนและเถ้า โดยในระหว่างการหุงเชื่อมเมล็ดเป็นตัวขบวนการดูดซึมน้ำของเมล็ดข้าว และไขมันอาจไปเกาะเกี่ยวกับอะไมโลส ส่วนโปรตีนก็แย่งการดูดซึมน้ำของสตาร์ช ทำให้เนื้อสัมผัสของข้าวกล้องแข็งกว่าข้าวขัดขาว ดังนั้นการขัดสีจึงส่งผลให้เมล็ดข้าวมีความอ่อนนุ่มมากขึ้น (Dalai and Tongta, 2008) นอกจากนี้ความแข็งและความเคี้ยวของข้าวมีความสัมพันธ์กับค่า Final viscosity ( $r = 0.737$ ) เพราะความแข็งและแรงที่ใช้ในการเคี้ยวของข้าวและค่า Final viscosity น่าจะเป็นผลมาจากการเกิดรีโทรกราเดชันเช่นเดียวกันนั่นเอง

Table 42 Hardness and cohesiveness of pigmented rice grain

Rice varieties		Brown rice texture		Milled rice texture	
		Hardness (kg)	Chewiness (kg.s)	Hardness (kg)	Chewiness (kg.s)
Non waxy rice	HK	10.35±0.09 <sup>d</sup>	65.14±0.76 <sup>e</sup>	2.91±0.09 <sup>f</sup>	19.82±1.04 <sup>d</sup>
	KN	7.90±0.20 <sup>c</sup>	48.64±3.21 <sup>d</sup>	2.46±0.07 <sup>e</sup>	16.81±0.59 <sup>c</sup>
	SY	5.66±0.36 <sup>a</sup>	33.24±2.14 <sup>a</sup>	2.24±0.10 <sup>d</sup>	14.29±1.07 <sup>ab</sup>
Waxy rice	RWR 96060	12.03±0.20 <sup>e</sup>	66.17±3.83 <sup>e</sup>	2.23±0.05 <sup>d</sup>	16.42±1.50 <sup>bc</sup>
	BWR 96025	7.40±0.05 <sup>bc</sup>	40.81±0.69 <sup>c</sup>	2.19±0.06 <sup>cd</sup>	15.75±0.60 <sup>bc</sup>
	CMP	11.35±0.78 <sup>e</sup>	64.82±1.36 <sup>e</sup>	1.75±0.10 <sup>a</sup>	13.38±0.95 <sup>a</sup>
	KR	6.17±0.56 <sup>a</sup>	36.25±3.30 <sup>ab</sup>	1.88±0.10 <sup>ab</sup>	15.03±0.87 <sup>abc</sup>
	BWR 96044	7.07±0.52 <sup>b</sup>	39.79±2.20 <sup>bc</sup>	2.04±0.10 <sup>bc</sup>	16.27±1.77 <sup>bc</sup>

Mean value ± standard deviation of five replicates.

Mean value with different letter in the same column are significantly different ( $p < 0.05$ )

#### 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 ไปหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนั้นๆ ได้ผลดังต่อไปนี้

##### 4.6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีกับปริมาณธาตุเหล็ก โพลีฟีนอลและความสามารถในการกำจัดอนุมูล ABTS<sup>•+</sup>

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

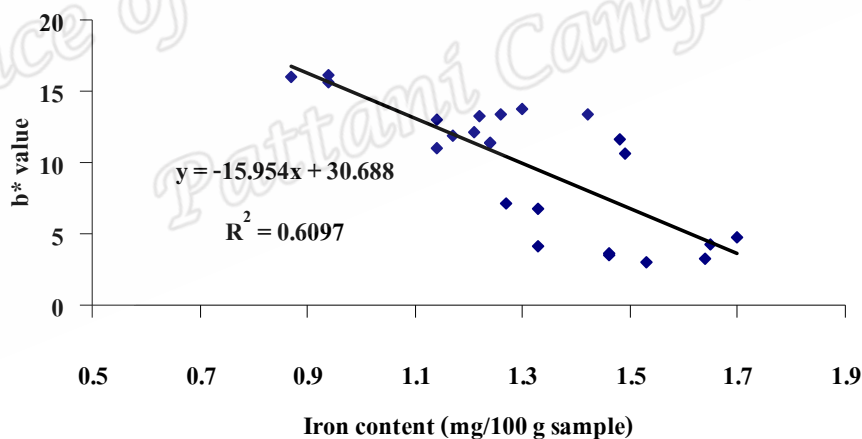


Fig 16 The relationship between  $b^*$  value and iron content of pigmented brown rices

นอกจากนี้ค่า  $L^*$   $a^*$  และ  $b^*$  ของเมล็ดข้าวกล้องยังมีความสัมพันธ์แบบสมการเส้นตรงเชิงลบกับปริมาณสารโพลีฟีนอลอีกด้วย 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 และมีค่าสีแดงและม่วงเพิ่มขึ้น จะพบปริมาณสารโพลีฟีนอลมากขึ้น

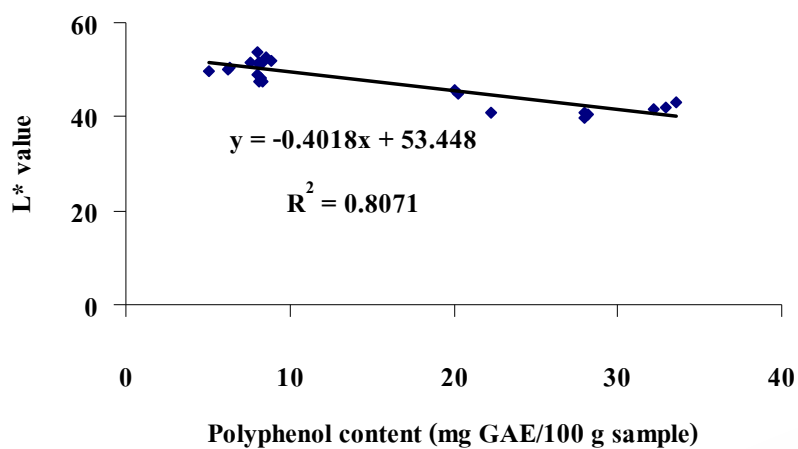


Fig 17 The relationship between L\* value and polyphenol content of pigmented brown rices

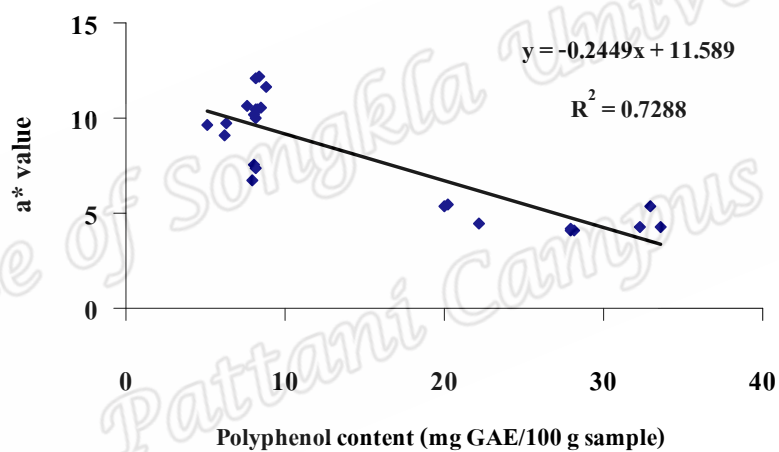


Fig 18 The relationship between a\* value and polyphenol content of pigmented brown rices

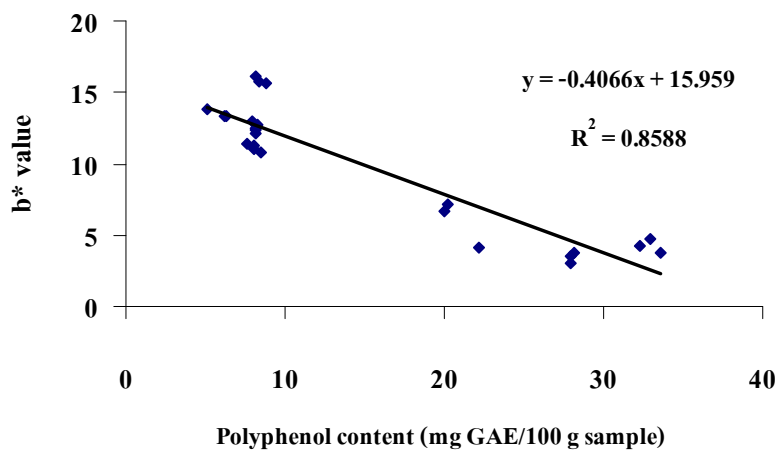


Fig 19 The relationship between b\* value and polyphenol content of pigmented brown rices

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

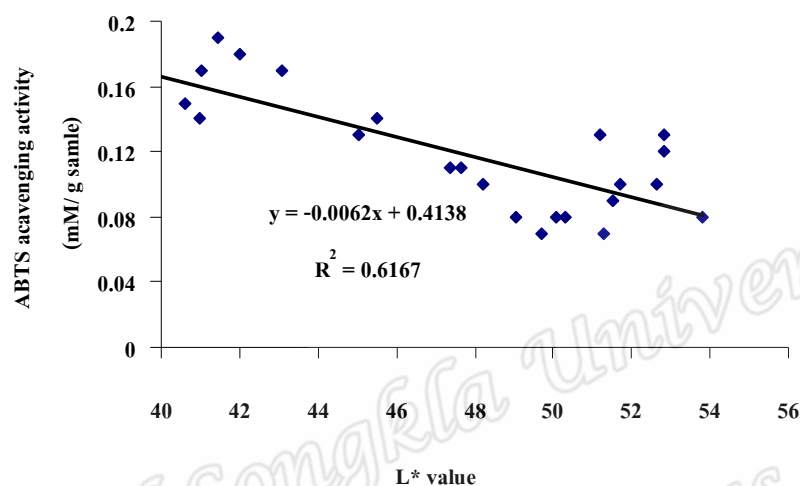


Fig 20 The relationship between  $b^*$  value and polyphenol content of pigmented brown rices

#### 4.6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะไมโลสและความหนืดอินทรีนสิก

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

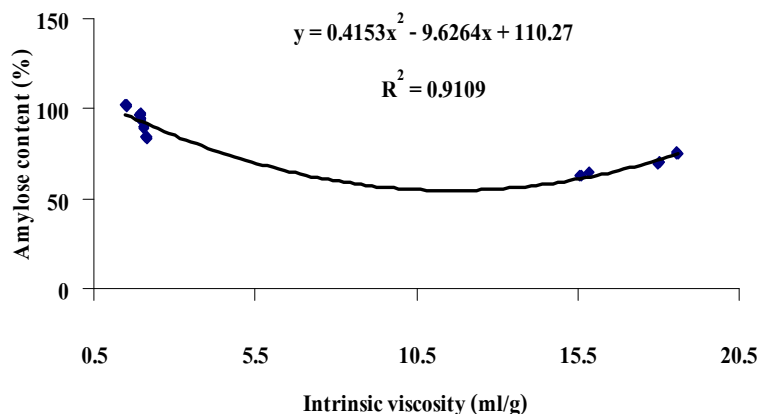


Fig 21 The relationship between of amylose content and intrinsic viscosity of pigmented rices

#### 4.6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไขมันและอัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าว

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

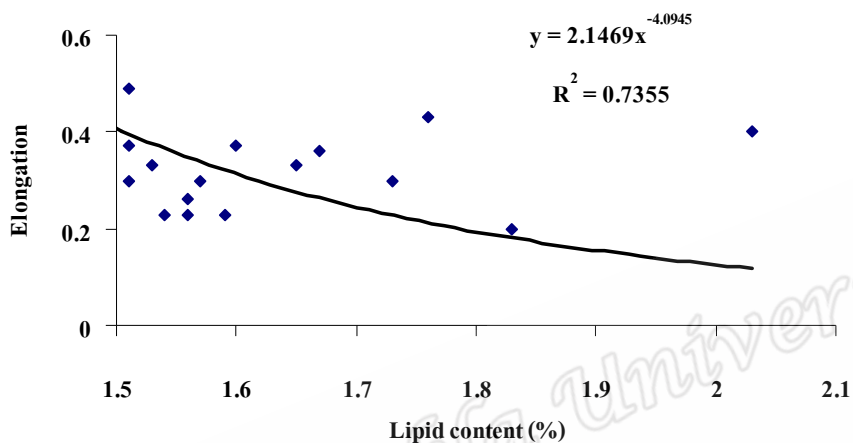


Fig 22 The relationship between lipid content and elongation of pigmented rices